



**Pedro Guilherme Peixoto Gonçalves**

Licenciado em Engenharia Física

## **Aperfeiçoamento de um manómetro do tipo Spinning Rotor Gauge**

Dissertação para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Física

Co-Orientador: Doutor Orlando M. N. D. Teodoro Professor  
Associado com Agregação, Universidade Nova  
de Lisboa

Co-Orientador: Doutor José Luís Constantino Ferreira Professor  
Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Presidente: Isabel Catarino  
Arguente: Pedro Vieira  
Orientador: Orlando Teodoro



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2019**



**Aperfeiçoamento de um manómetro do tipo  
Spinning Rotor Gauge**

**Pedro Guilherme Peixoto Gonçalves**

**Setembro de 2019**

## **Aperfeiçoamento de um manómetro do tipo Spinning Rotor Gauge**

Copyright © 2019 Pedro Guilherme Peixoto Gonçalves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Para a minha futura noiva.*



## Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores que me acompanharam durante este percurso. Ao Doutor Orlando Teodoro, por me introduzir a este projeto e acreditar nas minhas capacidades para o desenvolver, bem como pela disponibilidade que sempre demonstrou e pela partilha de conhecimento. Ao Doutor José Luís Ferreira, por todos os seus contributos, paciência para me ouvir e incentivos para procurar fazer o melhor possível neste projeto.

Agradeço também ao Doutor Nenad Bundaleski e à Doutora Ana Fonseca, cujas discussões estimulantes e partilha de opiniões se refletiram em ideias e melhoramentos para este trabalho.

Um enorme bem-haja a Afonso Moutinho, pela sua prontidão em ajudar, pelos conselhos imprescindíveis, pela partilha de experiência e pela simpatia e excelência no local de trabalho.

Agradeço ainda a José Carlos Mesquita e a João Faustino, pela boa disposição sempre presente e pelo auxílio no laboratório de projeto de estágio e na oficina do departamento de física.

Aos meus colegas Cristiano Dionizio, pela mútua troca de ideias, e Ricardo Silva pela ajuda preciosa na montagem final deste protótipo.

A todos os meus incríveis amigos, em especial à Inês D. Martins, Joana P. Vicente, Pedro P. Dias, João J. Bernardo e Tomás C. Marques, por proporcionarem todos os momentos que partilhámos.

Um bem-haja muito especial aos meus pais, João Gonçalves e Maria Helena Peixoto e à minha irmã, Maria Gonçalves, por plantarem e nutrirem o meu gosto pelo conhecimento, pelo apoio e motivação.

Por fim, gostava de deixar um incomensurável agradecimento à Angie, com quem partilhei este percurso repleto de experiências únicas, pela cumplicidade incondicional e por ser exatamente quem é.





## Resumo

A medição da pressão entre a atmosfera e o ultra alto vácuo abrange muitas ordens de grandeza, pelo que não existe nenhum medidor capaz de cobrir todo este intervalo. Vários instrumentos têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo de mais de um século, sendo que muitos estão comercialmente disponíveis sob a forma de equipamentos bastante evoluídos. No entanto, isto não significa que alguns medidores não possam vir a ser ainda melhorados.

Um destes instrumentos é o *Spinning Rotor Gauge* [SRG], o qual será o foco de estudo para a presente dissertação, que assentará nas bases previamente estabelecidas pela dissertação de mestrado de Pedro Almeida: *Cylindrical Spinning Rotor Gauge – A new approach for vacuum measurement*.

Este trabalho tentou em primeira instância replicar os resultados obtidos por Almeida, e posteriormente melhorar os circuitos eletrónicos e desenvolver um sistema integrado de aquisição de dados e controlo. Desenvolveu-se um protótipo completo e apresentam-se o comportamento dos vários subsistemas bem como os obstáculos a ultrapassar para possibilitar a medição de pressões em vácuo.



## Conteúdo

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Conteúdo .....	ix
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
1. Introdução .....	1
2. Análise Inicial - Da esfera ao cilindro.....	3
Princípio de funcionamento do <i>Spining Rotor Gauge</i> .....	3
Enquadramento do SRG em tecnologia de vácuo.....	5
Da Frequência à Pressão – Interação entre o rotor e o gás .....	7
Outras fontes de atrito – Limite do <i>Spining Rotor Gauge</i> .....	9
Cálculo da taxa de desaceleração do rotor .....	10
Um novo ponto de partida – A continuação de uma Tese .....	12
Estado do protótipo precedente – Redefinição de Objetivos .....	14
3. Protótipo Proposto – Subsistemas e Protótipo Final .....	17
3.1. Sistema de levitação vertical .....	17
Funcionamento – Levitação Macro Estável.....	17
3.2. Sistema de estabilização lateral .....	25
3.3. Sistema de aceleração do Rotor.....	31
Circuito do sistema de aceleração.....	32
A Limitação do Sistema – Um problema de ressonâncias.....	37
3.4. Sistema de aquisição de dados .....	39
3.5. Montagem do Protótipo – Dispositivo e Controlo .....	43
Redesenho do Dispositivo .....	43
Um novo sistema de controlo .....	49
4. Testes Finais do Protótipo - Um novo ponto de partida.....	51
Testes à levitação vertical .....	52
Testes à estabilização lateral.....	53
Sistema de Aceleração e Sistema de Aquisição de dados.....	54
5. Conclusões Finais .....	55
6. Bibliografia .....	57
7. Anexos .....	I



## Índice de Figuras

Figura 2-1 – Esquema ilustrativo dos modos de vibração disponíveis para as duas geometrias de rotor. Pode inferir-se facilmente que para o caso da esfera não existe diferença para a variação angular. Esquema baseado no estudo de Fremerey [5]. .....	3
Figura 2-2 – Esquema simplificado dos quatro sistemas que compõem o protótipo proposto. ....	4
Figura 2-3 – Esquema do primeiro Spining rotor Gauge proposto por Beams em 1962 [8].....	5
Figura 2-4 – Diagrama da colisão de uma molécula com rotor com uma transferência do momento perfeita. ....	7
Figura 2-5 – Processo simples de obtenção de frequências médias consecutivas. Figura adaptada de Fremerey [2]. ....	10
Figura 2-6 – Valores de desaceleração relativa em função da pressão de referência em escala logarítmica obtidos por Almeida [1]. ....	12
Figura 2-7 – Exemplo do estado em que se encontravam os contactos de um dos circuitos constituintes do protótipo anterior.....	14
Figura 2-8 – Exemplos de alguns componentes inutilizados pela falta de contactos ou por avaria. ....	15
Figura 2-9 – Estado do suporte do solenoide utilizado no protótipo anterior. ....	15
Figura 3-1 – Comparação entre a), a primeira proposta de Holmes para um sistema com levitação magnética [7] e b), o SRG proposto por Fremerey [2]. Em a) observa-se 1 e 2 – Solenoide de levitação; S – fonte de luz; L – lente focal; P – uma célula fotossensível; e o rotor V composto por N – Vara e D – disco de amortecimento. Em b) consta A – Solenoide de suspensão vertical; M – Íman permanente; P – Bobine de arranque; L – Bobine de estabilização horizontal; D – Bobine de aceleração do rotor; V – Encapsulamento para vácuo; e R – Rotor. 17	
Figura 3-2 – Simplificação do princípio de funcionamento do sistema de levitação vertical com controlo por <i>feedback</i> . Pode observar-se i) – Solenoide de levitação vertical; ii) – limite de referência; e iii) o rotor, bem como a evolução da intensidade do campo magnético em função da posição do rotor. ....	19
Figura 3-3 – Diagrama de um sistema de levitação por <i>feedback</i> baseado nos esquemas de Fremerey [5].....	20
Figura 3-4 – Exemplos de utilização de sensores de impedância. a) Solução proposta por Fremerey com espiras simples [5]; b) primeiro protótipo proposto por Almeida com sensores de hall superiores e inferiores ao solenoide de levitação vertical [1]. A diferença entre os sinais deste par de sensores, seria devido à deslocação do rotor. ....	21
Figura 3-5 – Relação entre a percentagem de feixe bloqueado pelo rotor e o sinal produzido pelo fototransístor. i) e ii) representam respetivamente o fotodíodo e o fototransístor.....	22
Figura 3-6 – Esquema do circuito de levitação vertical. ....	22
Figura 3-7 – Possível comportamento do rotor durante o arranque, devido à sua posição inicial. ....	23
Figura 3-8 – Vista em corte de uma tampa para a camara de vidro que possibilita a remoção do rotor do seu interior. ....	24
Figura 3-9 – Análise elaborada por Almeida [1] utilizando método de elementos finitos para determinar a influencia de um circuito magnético no campo magnético de um solenoide. ....	25
Figura 3-10 – Primeira proposta de Almeida [1] com 4 bobines laterais, focado na estabilização da extremidade inferior do rotor a) e proposta final com 8 bobines laterais b).....	26
Figura 3-11 – Evolução da estabilização horizontal do rotor por um par de bobines. As correntes que alimentam a bobine A (Laranja) e a bobine B (Azul) são simétricas uma vez que, se o rotor se aproximar de uma das bobines, obrigatoriamente afasta-se da oposta. ....	26
Figura 3-12 – Diagrama de um par de sensores de Hall e respetivas bobines [1]......	27
Figura 3-13 – Esquemas dos circuitos de Offset a) e Timer b) que auxiliam o circuito de estabilização lateral. ....	28
Figura 3-14 – Subsistema de estabilização lateral correspondente a um par de sensores de Hall. ....	28
Figura 3-15 – Esquema do circuito completo de estabilização lateral. ....	29

Figura 3-16 – Comportamento do campo magnético produzido pelas bobines de aceleração e do campo induzido no rotor. ....	31
Figura 3-17 – Esquema do circuito de aceleração utilizado por Almeida [1]. ....	32
Figura 3-18 – Correntes típicas que alimentam as bobines de rotação. ....	33
Figura 3-19 – Sinal à saída do circuito de aceleração correspondente ao <i>Output</i> A e B da Figura 3-18. Pode observar-se uma deformação severa do sinal em relação ao esperado teoricamente. ....	34
Figura 3-20 – Circuito de aceleração do rotor. ....	34
Figura 3-21 – Novo sinal de <i>output</i> do circuito de aceleração. ....	35
Figura 3-22 – Dissipador aplicado ao IC L293D. ....	36
Figura 3-23 – Dissipador aplicado diretamente no Ground do circuito. ....	36
Figura 3-24 – Gráfico genérico da frequência de rotação do rotor com três fases de operação. ....	39
Figura 3-25 – Diagrama do sistema de aquisição de dados com o pormenor da posição relativa do fototransístor e fotodíodo em relação ao rotor. ....	40
Figura 3-26 – Circuito do sistema de aquisição de dados. ....	40
Figura 3-27 – Sinal de rotação do rotor para diferentes valores de frequência. ....	41
Figura 3-28 – Protótipo final com o respetivo encapsulamento. ....	44
Figura 3-29 – Protótipo final sem o encapsulamento superior. ....	44
Figura 3-30 – Suportes que constituem o dispositivo. ....	46
Figura 3-31 – Fase intermedia da montagem do dispositivo. ....	47
Figura 3-32 – Placa PCB responsável pelas ligações entre os sensores/bobines e o controlo, e respetivos suportes. ....	48
Figura 3-33 – Interior da caixa de controlo. ....	49
Figura 3-34 – Frente da caixa de controlo. ....	50
Figura 4-1 – Sinal do Sistema de levitação vertical. ....	52
Figura 4-2 – Sinal do sistema de estabilização durante uma oscilação forçada do sistema. ....	53
Figura 7-1 – Código responsável pelo controlo do circuito de aceleração. ....	I
Figura 7-2 – Código necessário para o cálculo da pressão. ....	II
Figura 7-3 – Vista em explosão dos vários componentes modelados. ....	III

## Índice de Tabelas

Tabela 2-1 – Seleção de estudos de relevância tecnológica para o desenvolvimento do Spining Rotor Gauge, adaptado do estado de arte recolhido por Fremerey [6].....	6
Tabela 2-2 – Valores dos parâmetros para o cálculo teórico da pressão.....	11
Tabela 7-1 – Posição dos conectores do dispositivo. ....	IV





## 1. Introdução

A medição da pressão entre a atmosfera e o ultra alto vácuo, abrange muitas ordens de grandeza pelo que não existe nenhum medidor capaz de cobrir todo este intervalo. Vários instrumentos têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo de mais de um século, sendo que muitos estão comercialmente disponíveis sob a forma de equipamentos bastante evoluídos. No entanto, isto não significa que alguns medidores não possam vir a ser ainda melhorados.

Um destes instrumentos é o *Spinning Rotor Gauge* [SRG], o qual será o foco de estudo para a presente dissertação, que assentará nas bases previamente estabelecidas pela dissertação de mestrado de Pedro Almeida: *Cylindrical Spinning Rotor Gauge – A new approach for vacuum measurement* [1].

Na sua tese, Pedro Almeida sugere uma mudança fundamental da geometria do rotor no manómetro SRG, de esférico para cilíndrico, por forma a melhorar o seu desempenho, apresentando um estudo comparativo para várias dimensões do rotor. Almeida propõe um *cylindrical spinning rotor gauge* com um sistema de estabilização totalmente redesenhado para acomodar esta mudança de rotor. Foi ainda construído um protótipo cujas medições efetuadas foram comparadas às de um manómetro não calibrado de referência.

Esta tentativa de melhorar o SRG surge do interesse em desenvolver um manómetro que consiga abranger mais ordens de grandezas do que os manómetros disponíveis, bem como do facto de que a última tentativa de melhorar o SRG aparenta ter sido em 1984 por Fremerey [2]. Existem estudos mais recentes que exploram as limitações do SRG com versões otimizadas deste manómetro, mas sem modificar significativamente o seu princípio de funcionamento (ex. Lindenau em 1995 [3], que explora problemas relacionados com a tolerância no desalinhamento da cabeça do instrumento, Isogai em 1997 [4], onde se discute a influência de correntes de eddy na precisão das medidas de pressão com um SRG).

O SRG consegue abranger um intervalo de pressões desde  $10^{-7}$  mbar até à pressão atmosférica, operando com uma interação mínima com o gás, sem o aquecer, ionizar, ou alterar de qualquer outra forma as suas propriedades, tornando-se assim extremamente interessante do ponto de vista do seu desenvolvimento.

Assim sendo, aumentar o intervalo de pressões possíveis de medir, bem como, diminuir o custo do manómetro e mantendo ou melhorando a sua estabilidade de medidas, constituíram algumas das principais motivações para a elaboração desta dissertação.

Este trabalho tentou em primeira instância replicar os resultados obtidos por Almeida, e posteriormente melhorar os circuitos eletrónicos e desenvolver um sistema integrado de aquisição de dados e controlo.



## 2. Análise Inicial- Da esfera ao cilindro

### Princípio de funcionamento do *Spining Rotor Gauge*

Uma vez estabelecido o interesse do desenvolvimento deste manômetro, importa compreender o seu funcionamento para se poder estudar os resultados anteriormente atingidos por Almeida na sua tese.

A ideia por de trás do SRG é medir o atrito de um rotor produzido pelo gás presente na câmara de vácuo, e converter esses valores em valores de pressão. Para este fim, faz-se uso de um rotor suspenso magneticamente no interior da câmara que se pretende medir a pressão. Este rotor é forçado a rodar sobre o seu eixo vertical e acelerado. Após este atingir uma determinada velocidade angular (usou-se como referência 400Hz, a velocidade angular de um SRG esférico [5]), o sistema deixa de forçar o rotor a acelerar, e analisa a perda de velocidade. Por muito rarefeito que seja o gás dentro da câmara, as suas partículas continuam a interagir com o rotor, diminuindo a sua velocidade. Esta desaceleração é, portanto, proporcional à pressão do gás presente na câmara. Este processo é descrito com relativa simplicidade, mas a sua implementação não só é complexa para um rotor esférico, como se torna ainda mais difícil para um rotor cilíndrico. Por exemplo, o uso de um cilindro adiciona um grau de liberdade de vibração (angular), em relação ao SRG esférico. Esta diferença pode ser facilmente compreendida através da Figura 2-1.

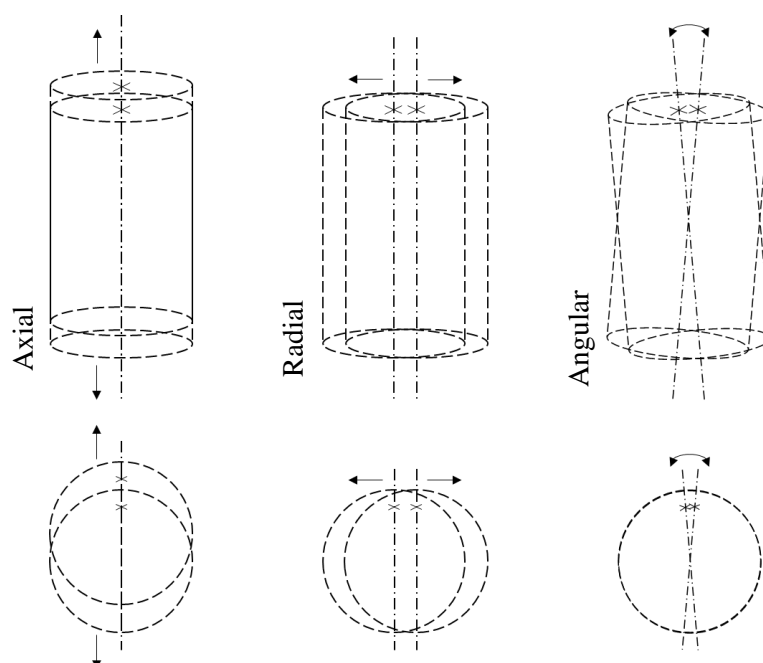


Figura 2-1 – Esquema ilustrativo dos modos de vibração disponíveis para as duas geometrias de rotor. Pode inferir-se facilmente que para o caso da esfera não existe diferença para a variação angular. Esquema baseado no estudo de Fremerey [6].

O principal objetivo da alteração da geometria do rotor, surge da tentativa de aumentar a área de interação do rotor com o gás a ser estudado, mantendo ou minimizando o seu momento de inércia. As possibilidades que um rotor cilíndrico oferece neste sentido, constituíram a principal motivação para a alteração de geometria. Um estudo das implicações de se usar um rotor cilíndrico serão apresentadas e discutidas com maior detalhe na secção seguinte.

Para ajudar na compreensão do princípio de funcionamento, é apresentado, na Figura 2-2, um esquema simplificado do protótipo proposto, onde se pode observar os quatro principais sistemas que compõem este SRG.

A levitação do rotor, apresentado a cinzento na Figura 2-2, é assegurada pelo sistema de suspensão vertical, que é composto por um solenóide com um núcleo ferromagnético, e respetiva eletrónica.

Para assegurar que o rotor não se desloca da sua posição de equilíbrio, um sistema de estabilização lateral influencia o campo magnético de forma a compensar possíveis vibrações. No protótipo final, este sistema conta com oito bobines paralelas ao rotor de forma a se obter uma estabilização adequada.

A aceleração angular do rotor, descrita anteriormente, é possível devido a quatro bobines perpendiculares ao rotor, que são alternadamente alimentadas de forma a alterar a orientação do campo magnético.

O sistema de aquisição utiliza um par fototransístor-LED que avalia a refletividade da superfície do rotor. Uma vez que este se encontra a rodar sobre o seu eixo vertical, surge um padrão de reflexão que se repete a cada revolução completa. A velocidade angular mede-se pelo intervalo de tempo que leva ao rotor a completar um determinado número de revoluções.

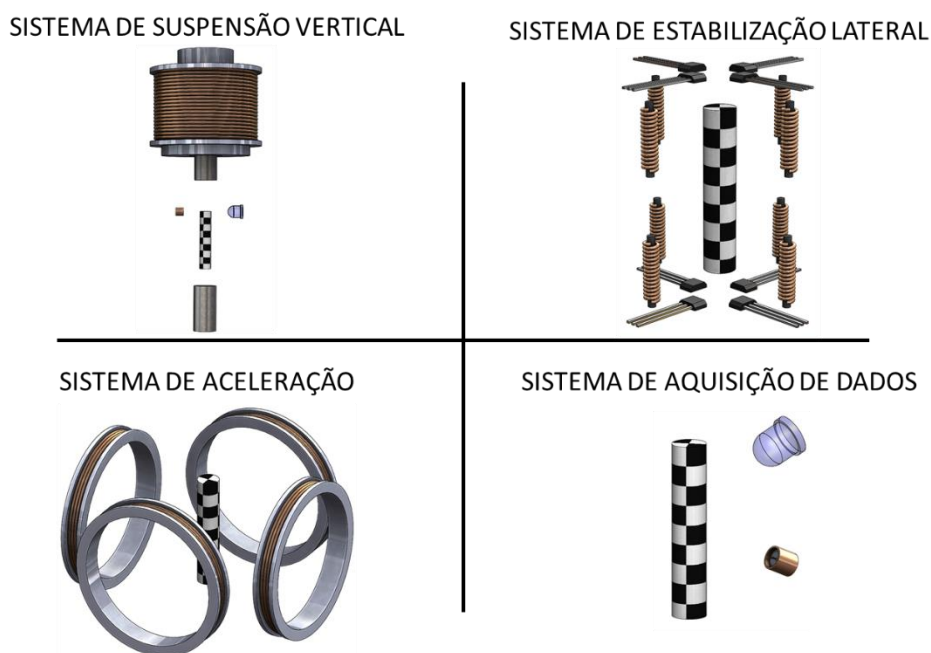


Figura 2-2 – Esquema simplificado dos quatro sistemas que compõem o protótipo proposto.

A estrutura e princípio de funcionamento descritos até agora são muito semelhantes ao SRG proposto por Fremerey em 1984 [2]. Contudo, a ideia de que a interação de um corpo rotativo com o gás envolvente pode fornecer informação sobre o esse mesmo fluido não é tão recente, remontando ao século XIX [7]. Nestes primeiros estudos, a suspensão do rotor era feita através de um fio, o que limita consideravelmente a sensibilidade do dispositivo, principalmente quando comparado com os aparelhos que fazem uso de levitação magnética. A torção do fio permitia apenas a rotação do rotor até um determinado ponto, momento a partir do qual a rotação seria no sentido contrário ao anterior.

O uso de suspensão magnética só se começou a desenvolver após os estudos de Holmes em 1937 [8], nos quais se propõe um dos primeiros sistemas de levitação magnética por *feedback* ativo. Apenas mais tarde, em 1962, surge o primeiro SRG com levitação magnética (Figura 2-3) proposto por Beams [9], na sequência do seu trabalho com campos centrífugos (*Centrifugal Fields*) [10].

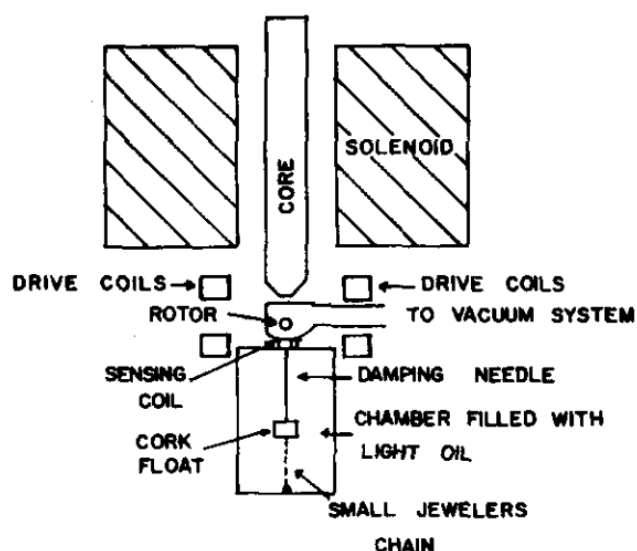


Figura 2-3 – Esquema do primeiro Spining Rotor Gauge com levitação magnética proposto por Beams em 1962 [9].

O sistema de levitação magnética com controlo por realimentação (*feedback*), é analisado com maior detalhe na descrição do circuito de suspensão vertical utilizado para o presente protótipo.

Fremerey elabora um estado de arte em 1982 (Tabela 2-1) acerca dos contributos fundamentais para o desenvolvimento do SRG [7], não só pela elaboração de um manómetro de pressão, mas também por contribuições teóricas ou dispositivos cujo o desenvolvimento tecnológico contribuiu de alguma forma para a evolução do SRG. Por exemplo, o protótipo desenhado por Beams usado para a aceleração angular de rotores até ao ponto de desintegração

[10], não pretendia a medição de pressões, no entanto a sua elaboração contribuiu para o desenvolvimento do primeiro SRG com o uso de levitação magnética.

Tabela 2-1 – Seleção de estudos de relevância tecnológica para o desenvolvimento do Spining Rotor Gauge, adaptado do estado de arte recolhido por Fremerey [7].

Autores	Ano de publicação	Geometria do rotor	Suspensão	Parâmetro em estudo	Intervalo de pressões (mbar)
Meyer	1865	Disk	Bifilar wire	Viscosidade	$10^3 - 1$
Maxwell	1866	“	Single wire	“	$10^3 - 10$
Knudt and Warburg	1875	“	Bifilar wire	“	$10^3 - 1$
Hogg	1906	“	Single wire	Pressão	$10^{-1} - 10^{-4}$
Knudsen	1934	Sphere	“	Peso da mol	n/a
Beams et al	1946	“	ferromagnetic	Pressão	$10^{-5}$
Beams et al	1962	“	“	“	$10^{-4} - 10^{-7}$
Harbour and Lord	1965	“	“	“	$10^{-3} - 10^{-5}$
Evrard and Beaufrils	1965	Vane	diamagnetic	“	$10^{-3} - 10^{-7}$
Thomas and Lord	1974	Sphere	ferromagnetic	Transferência de momento	n/a
Lord	1977	Disk	“	“	$10^{-2} - 10^{-3}$
Lord and Thomas	1997	“	“	“	$10^{-2}$
Comsa et al	1997	Sphere	permanent ferromagnetic	“	$10^{-3} - 10^{-4}$
Comsa et al	1980	“	“	“	$10^{-2} - 10^{-5}$
Comsa et al	1980	sphere and vane	“	“	$10^{-3} - 10^{-4}$
Messer	1980	sphere	“	Pressão	$7 \cdot 10^{-4}$
Messer and Rubet	1980	sphere and vane	permanent ferromagnetic and diamagnetic	“	$3 \cdot 10^{-4}$

Posteriormente, Fremerey é o principal responsável pelo desenvolvimento do SRG, nomeadamente no aperfeiçoamento da eletrónica, permitindo-lhe apresentar um dispositivo extremamente robusto. Fremerey descreve também em pormenor a interação do rotor com as moléculas do gás, definindo a relação entre a pressão e taxa de desaceleração do rotor.

Este enquadramento do SRG é importante para o estudo de baixas pressões para compreender a sua evolução, mas é necessário desenvolver a interação do gás com a superfície do rotor, principalmente no contexto da elaboração deste projeto. Compreender esta interação é essencial para se poder estudar os resultados anteriormente atingidos e definir objetivos para a presente dissertação.

## Da Frequência à Pressão – Interação entre o rotor e o gás

O modelo teórico que se apresenta nesta secção resulta do estudo de vários autores apresentados no estado da arte de Fremerey [7]. Para compreender a relação entre a pressão e a desaceleração relativa do rotor, é necessário descrever a interação entre as moléculas do gás e o rotor.

Devido à quase perfeita transferência de momento, após uma molécula colidir com a superfície do rotor, esta é adsorvida temporariamente. Enquanto adsorvida, a molécula adquire a velocidade da superfície do rotor e, conseqüentemente, adquire também do rotor o respetivo momento angular. Esta é a única transferência de momento que é considerada para os cálculos, uma vez que tanto a adsorção como a desadsorção dá-se isotropicamente ao longo do rotor. Significa isso que, em média, a componente tangencial do momento das várias colisões acaba por se cancelar. A Figura 2-4 ilustra de forma simples as várias fases da colisão, durante a qual se dá a transferência de momento do rotor para as moléculas do gás.

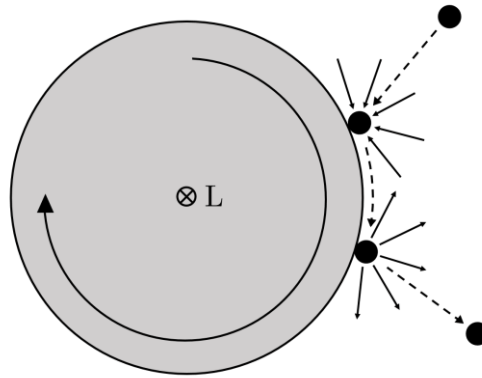


Figura 2-4 – Diagrama da colisão de uma molécula com o rotor com uma transferência do momento perfeita, adaptado do trabalho de Almeida [1].

O momento angular que a molécula obtém do rotor pode então ser expressa em função do seu momento de inércia e da velocidade que adquire ( $\omega$ ). Assumindo que uma molécula se pode aproximar a um ponto de massa a orbitar um eixo, o seu momento de inércia  $I$  é dado por  $md^2$ , em que  $d$  é a distância da molécula ao eixo e  $m$  a massa da molécula.

$$L = I\omega \tag{2.1}$$

$$L = md^2\omega \tag{2.2}$$

Uma vez que a transferência de momento é do rotor para a molécula, a variação do momento do rotor pode ser expressa pela perda de momento para cada molécula (equação 2.2). Dada a frequência com que as moléculas colidem com o rotor, a perda de momento para o gás envolvente por unidade de tempo pode ser expressa pela multiplicação das equações seguintes. Onde  $f$  é o número de colisões numa superfície elementar  $dA$  por segundo,  $p$  refere-se à pressão exercida pelo gás, e  $\bar{c}$  é a velocidade média molecular.

$$\Delta L = -md^2\omega \quad 2.3$$

$$f = \frac{2p}{\pi m\bar{c}} dA \quad 2.4$$

$$\Delta \frac{L}{dt} = -md^2\omega \frac{2p}{\pi m\bar{c}} dA \quad 2.5$$

Calculando esta expressão para o limite infinitesimal, obtém-se a derivada em ordem ao tempo do momento angular. Se se derivar a expressão 2.1 em ordem ao tempo é possível então obter a relação entre a taxa da frequência angular, ou desaceleração relativa, e a pressão.

$$\frac{L}{dt} = - \int \frac{2pd^2\omega}{\pi\bar{c}} dA \quad 2.6$$

Substituindo a expressão 2.1 derivada em ordem ao tempo:

$$I\dot{\omega} = - \int \frac{2pd^2\omega}{\pi\bar{c}} dA \quad 2.7$$

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{2p}{I\pi\bar{c}} \int d^2 dA \quad 2.8$$

A equação 2.8 expressa o resultado mais genérico para a variação da frequência do rotor sem geometria definida. A solução para uma geometria cilíndrica pode ser deduzida a partir desta expressão, sendo que o integral passa a ser igual à soma do integral para ambas as bases do cilindro com o integral da superfície lateral. Para o rotor cilíndrico, a distância  $d$ , entre a molécula e o eixo de rotação, é igual ao raio do cilindro. Onde  $r$  e  $h$  são o raio e a altura do cilindro respetivamente.

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{2p}{I\pi\bar{c}} \left( 2 \int_0^{2\pi} \int_0^r d^2r dr d\theta + \int_0^h \int_0^{2\pi} d^2r d\theta dz \right) \quad 2.9$$

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{2p}{I\pi\bar{c}} \left( 2 \int_0^{2\pi} \int_0^r r^3 dr d\theta + \int_0^h \int_0^{2\pi} r^3 d\theta dz \right) \quad 2.10$$

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{2p}{I\pi\bar{c}} (\pi r^4 + 2\pi h r^3) \quad 2.11$$

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{2pr^3}{I\bar{c}} (r + 2h) \quad 2.12$$

Uma vez que o momento de inércia para um cilindro é dado por  $\frac{1}{2}mr^2$ , e que a massa do rotor pode ser expressa em função do seu volume e densidade, a expressão pode ser simplificada.

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{4p\sigma}{\pi r\rho\bar{c}} \left( \frac{r}{h} + 2 \right) \quad 2.13$$

Uma vez que a interação das moléculas com o rotor está dependente da sua superfície, multiplica-se um fator de correção  $\sigma$  ao lado direito da expressão, que toma valores perto de 1 dependendo da rugosidade do rotor.



De uma forma genérica, a igualdade seguinte expressa a origem de outras fontes de atrito que, em conjunto com o gás, influenciam a variação total da frequência de rotação do rotor. Esta relação surge dos estudos das limitações do SRG desenvolvidos por Isogai, em 1997 [4].

$$\left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{Total} = \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{gás} + \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{temperatura} + \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{eletrostatica} + \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega}\right)_{eddy} \quad 2.14$$

O parâmetro dominante nesta expressão é o atrito proveniente da interação entre o rotor e as moléculas do gás, mas à medida que a pressão diminui a influência dos restantes parâmetros começa a emergir e a controlar o valor total.

Esta predominância para baixas pressões é o que dita o limite inferior de medida do SRG e como tal, um modelo teórico que acomoda apenas o primeiro parâmetro, referente ao gás, espera-se que seja suficiente para descrever o seu funcionamento acima desse limite. Para o caso do modelo de SRG que Fremerey propõe, o limite de medida é de  $10^{-6}$  mbar.

A expressão 2.14 surge do estudo de Isogai sobre as principais fontes de atrito presentes num SRG. A temperatura influencia o cálculo da expressão 2.8 e, consequentemente, da expressão 2.13, uma vez que a velocidade média das moléculas do gás está dependente da sua temperatura. Para além disso consideráveis variações de temperatura podem também influenciar as dimensões do rotor devido a expansões térmicas, influenciando mais uma vez a dedução das expressões anteriores.

A força eletrostática exercida sobre o rotor é apenas responsável por um *offset* na pressão calculada e não consiste um motivo de preocupação para as leituras finais, exceto no limite inferior de pressão.

As correntes de eddy, por outro lado, são as principais responsáveis pela existência de um limite inferior de medição do SRG, tipicamente a  $10^{-6}$  mbar. É expectável que este parâmetro seja predominante apenas para valores de pressão muito perto do limite de medição do aparelho. Estas correntes resultam essencialmente do campo magnético de aceleração do rotor. O cálculo destas correntes e da sua influência sobre o torque do rotor não são de todo triviais. A título de exemplo evoca-se o trabalho de Aubert 2012 [11] que apresenta uma análise extensiva sobre a influência destas correntes num cilindro rotativo sob a influência de um campo magnético homogéneo. A semelhança deste sistema com o protótipo proposto pode revelar-se um ponto de comparação útil. Outros trabalhos recentes apresentam também soluções analíticas para problemas de correntes de eddy, nomeadamente em cilindros [12], soluções essas que podem vir a ser adaptadas para este projeto. No entanto, como ponto de partida, a presente dissertação apenas tem em conta a expressão 2.13.

### Cálculo da taxa de desaceleração do rotor

Definido o modelo a usar e as suas limitações, é pertinente compreender como a aquisição da frequência do rotor pode ser relacionada com a sua desaceleração. Na prática, a grandeza que o protótipo adquire é o intervalo de tempo ( $\tau$ ) que o rotor demora a completar um determinado número de revoluções do rotor. Este intervalo de tempo é facilmente relacionável com a frequência angular do rotor segundo a expressão  $\omega = \frac{2\pi n}{\tau}$ , sendo  $n$  o número de revoluções durante o intervalo de tempo medido. No caso da Figura 2-5, cada medição corresponde ao tempo de 10 revoluções completas do rotor.

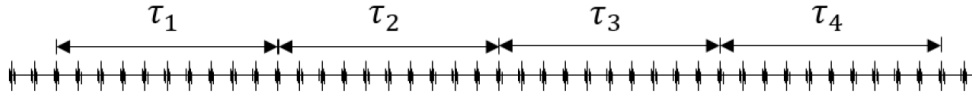


Figura 2-5 – Processo simples de obtenção de frequências médias consecutivas. Figura adaptada de Fremerey [2].

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} \approx -\frac{\Delta\omega}{\omega\Delta t} = \left| -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \right|_{av} \quad 2.15$$

Relacionando o acréscimo temporal que uma medição tem sobre a medição anterior, e a consequente variação da frequência angular, pode escrever-se:

$$-\frac{\omega_j - \omega_i}{\omega_i} \frac{1}{\Delta t} = \frac{\tau_j - \tau_i}{\tau_j} \frac{1}{\Delta t} \quad 2.16$$

$$-\frac{\Delta\omega}{\omega\Delta t} = \frac{\tau_j - \tau_i}{\tau_j} \frac{1}{\Delta t} \quad 2.17$$

Assumindo que as medições de  $\tau_i$  e  $\tau_j$  são consecutivas, o intervalo  $\Delta t$  entre o início da primeira medição e o início da segunda pode ser considerado igual a  $\tau_i$ , simplificando a expressão.

$$\left| -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \right|_{av} = \frac{\tau_j - \tau_i}{\tau_j * \tau_i} \quad 2.18$$

Este resultado não é a única solução possível para este sistema. Se se assumir que a desaceleração do rotor é suficientemente lenta para que  $\Delta\tau \ll \tau$  e consequentemente  $\tau_j \approx \tau_i \approx \tau$ , partindo da equação 2.17 deduz-se:

$$-\frac{\Delta\omega}{\omega\Delta t} = \frac{\Delta\tau}{\tau} \frac{1}{\Delta t} \quad 2.19$$

Se  $\tau$  for expresso como a média de  $\tau_i$  e  $\tau_j$ ,  $\left( \tau = \frac{(\tau_j + \tau_i)}{2} \right)$ ,

$$-\frac{\Delta\omega}{\omega\Delta t} = \frac{2(\tau_j - \tau_i)}{(\tau_j + \tau_i)} \frac{1}{\Delta t} \quad 2.20$$

Este resultado em particular pode ser utilizado para medições com intervalos de tempo entre elas, no entanto, se as medições forem consecutivas,  $\Delta t = \tau_i = \tau = \frac{(\tau_j + \tau_i)}{2}$  e obtém-se:

$$\left| -\frac{\dot{\omega}}{\omega} \right| = \frac{4(\tau_j - \tau_i)}{(\tau_j + \tau_i)^2} \quad 2.21$$

Estas soluções possibilitam a análise da desaceleração do rotor com apenas a medição de intervalos de tempo. A medição destes intervalos pode ser tão simples quanto ilustrado na Figura 2-5, ou medidos vários intervalos em paralelo, tal como Fremerey propôs em 1985 [2]. Esta medição em paralelo acrescenta alguma complexidade desnecessária para a fase em que o protótipo se encontra, mas tornar-se-á essencial para a viabilidade de resultados de futuras iterações deste projeto.

Pode então reescrever-se a relação entre a pressão e a desaceleração do rotor de acordo com a expressão:

$$p = 3.35 * 10^3 \frac{\dot{\omega}}{\omega} (Pa) \quad 2.22$$

Assumindo que todos os parâmetros da equação 2.13, com a exceção da pressão e da desaceleração do rotor, são constantes e, que  $\bar{c}$  pode ser expresso por:

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_m}} \quad 2.23$$

E que os valores de todos esses parâmetros (Tabela 2-2) podem ser substituídos pelos valores apresentados na Tabela 2-2 especificamente para o presente protótipo.

Tabela 2-2 – Valores dos parâmetros para o cálculo teórico da pressão

Parâmetros	Valores	Unidades
R	8.314	J/mol.K
T	293	K
M <sub>m</sub>	0.029	kg/mol
h	25.6	mm
r	2.5	mm
ρ	7730	kg/m <sup>3</sup>
σ	1	

O cálculo da pressão executado pelo sistema de aquisição de dados faz uso desta expressão, apesar de já se saber que não corresponde à realidade. Posteriormente, deve ser elaborada uma nova adaptação deste modelo teórico, que consiga identificar as causas do atrito extra. Este deveria ser o primeiro obstáculo a ser ultrapassado para uma nova dissertação que dê continuidade a este projeto.

De forma a sistematizar objetivos mais concretos para a presente tese, analisaram-se os resultados anteriormente obtidos de forma a estudar eventuais métodos de os otimizar. Assim sendo, compara-se a previsão teórica da curva de pressão com a curva correspondente aos resultados práticos.

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} = 299 * p \quad \text{ou} \quad p = 33.5 * \frac{\dot{\omega}}{\omega} \text{ (mbar)} \quad 2.24$$

Onde a pressão se encontra em mbar e o quociente entre as frequências angular equivale à taxa de desaceleração relativa. Importa referir que esta equação foi calculada assumindo que o interior da câmara se encontra em regime molecular. Existe uma pequena correção necessária para regime viscoso que pode ser, no âmbito desta comparação, ignorada, uma vez que a curva com a qual está a ser comparada foi obtida para baixas pressões ( $10^{-2}$  mbar a  $10^{-3}$  mbar).

O seguinte gráfico foi obtido para os valores de desaceleração relativa em função da pressão de referência e foi apresentado como resultado final do protótipo anterior (Figura 2-6). Foi assim possível obter uma expressão que corresponde à relação linear entre a desaceleração e a pressão. Note-se que o gráfico se encontra em escala logarítmica.

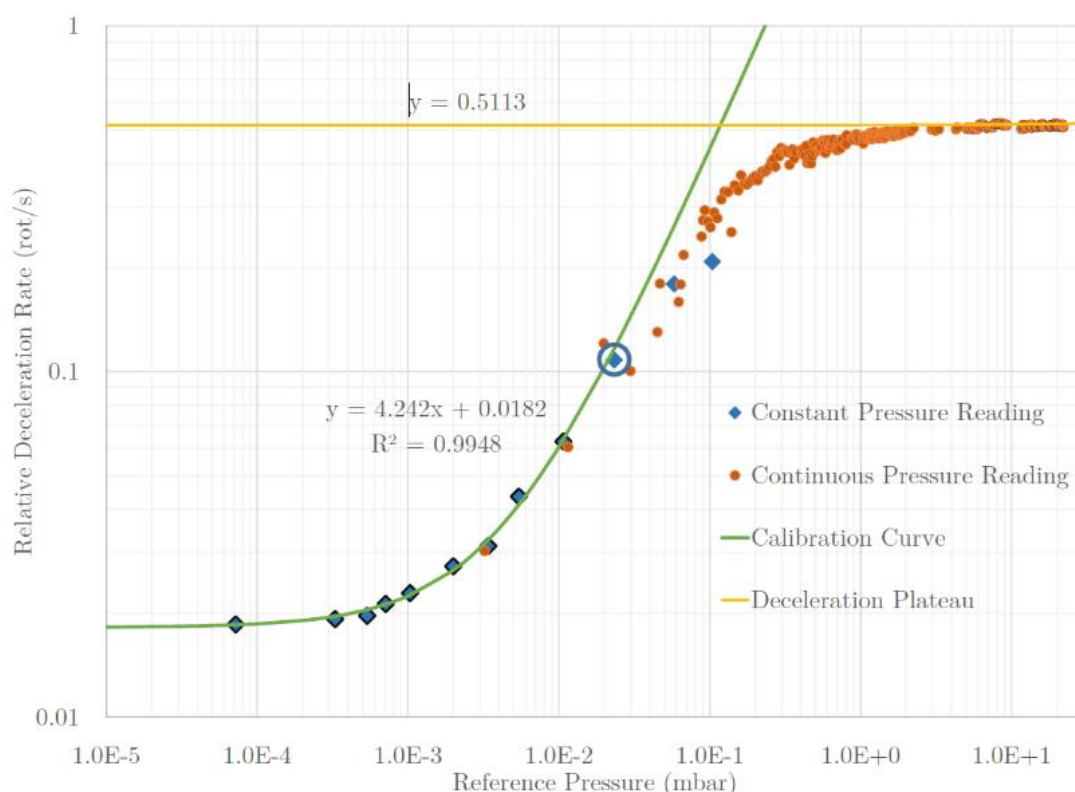


Figura 2-6 – Valores de desaceleração relativa em função da pressão de referência em escala logarítmica obtidos por Almeida [1].

Da Figura 2-6 pode então obter-se a relação entre a desaceleração do rotor e a pressão:

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} = 4.242 * p + 0.0182 \text{ (mbar)} \quad 2.25$$

Esta relação linear é expetável tendo em conta a expressão teórica, bem como os estudos apresentados por Fremerey [2], nos quais conclui esta linearidade para parâmetros experimentais muito semelhantes.

Embora se observe que efetivamente é possível relacionar a pressão com o desacelerar do rotor, a relação tem uma diferença de duas ordens de grandeza face ao cálculo teórico apresentado em 2.24. Para além disso, estes resultados implicam que a desaceleração do rotor se dê mais lentamente do que o previsto, o que é impossível devido à conservação de momento. Uma possível justificação é um erro no cálculo da pressão, ou na conversão de grandezas. Seria de esperar que o valor se que multiplica pela pressão, na expressão 2.25 fosse superior a 299, como calculado em 2.24, e não inferior.

Para além destes resultados serem impossíveis, Almeida faz uma interpretação errada dos mesmos, assumindo que aceleração se dá mais rapidamente do que o previsto e apontando algumas razões possíveis. Embora sirvam de justificação para resultados errados, estas razões continuam a ser válidas e é interessante estudar porque é que a desaceleração pode diferir do calculado, uma vez que é provável que se venha verificar isso mesmo devido à nova geometria do rotor. Almeida apresenta como possíveis razões para a discrepância da desaceleração calculada:

- O facto da pressão na câmara, medida pelo manómetro de referência, não ser a mesma pressão à qual o rotor está sujeito devido a uma ligação pouco adequada entre protótipo e a câmara;
- Possível inclinação do protótipo, levando a desalinhamentos do rotor em relação às bobines, gerando correntes de eddy não previstas;
- As dimensões do rotor serem significativamente superiores às da sua contraparte esférica, tornando-o mais suscetível a adicionais correntes de eddy.

A contribuição das correntes de eddy seria a principal razão para esta desaceleração extra, embora não fosse esperado que nenhum destes fenómenos causasse a diferença de duas ordens de grandeza observada. Almeida adiciona que, testes muito preliminares sugerem que o aumento da frequência inicial (superiores a 400 Hz, mas não especificando valores) causa um aumento do atrito. Este fenómeno está em concordância com a suposição de que as correntes de eddy são o fator principal deste atrito, uma vez que é esperado que, para maiores frequências de rotação, se dê uma maior indução das correntes de eddy no rotor.

Identificadas estas dificuldades, podem propor-se algumas melhorias possíveis.

Para evitar que o protótipo e o manómetro de referência estivessem sujeitos a pressões diferentes, uma montagem do sistema de vácuo alternativa à utilizada poderá ser idealizada. O

eventual desalinhamento do protótipo será sempre difícil de controlar sem um sistema mais complexo e cuidados acrescidos no posicionamento dos componentes. Em relação às correntes de eddy, pouco pode ser feito para as minimizar nesta fase do projeto e, o cálculo da sua contribuição será extremamente complexo e digno de um projeto posterior. Ainda assim, uma breve análise a estas correntes será realizada mais à frente nesta tese.

Todas estas propostas contribuíram para uma definição inicial dos objetivos desta tese, mas infelizmente houve necessidade de uma redefinição dos mesmos devido ao estado em que o protótipo anterior se encontrava.

#### Estado do protótipo precedente – Redefinição de Objetivos

As figuras seguintes (Figura 2-7 até Figura 2-9) demonstram o estado dos circuitos, bem como dos suportes e outras peças referentes ao protótipo. Como pode ser observado, com o decorrer do tempo, vários componentes que compunham os circuitos foram removidos possivelmente para reutilização.

Para além de componentes em falta, muitos dos sensores, transístores e bobines encontravam-se sem contactos ou avariados (Figura 2-8). Em relação aos suportes que constituíam o manómetro, muitas das peças encontravam-se fragilizados, ou mesmo partidas (Figura 2-9). Todos estes fatores obrigaram a uma nova montagem do protótipo desde o início, impedindo que fosse possível a reutilização de muitas das peças e de qualquer um dos circuitos até então desenvolvidos.

Felizmente algumas das peças mais complexas e difíceis de substituir não se encontravam deterioradas nem inutilizadas, pelo que puderam ser reaproveitadas. O melhor exemplo é sem dúvida a camara de vidro que envolve o rotor. No entanto o rotor em si apresenta sinais de oxidação que podem influenciar os valores de desaceleração, uma vez que estes estão dependentes da superfície do rotor.

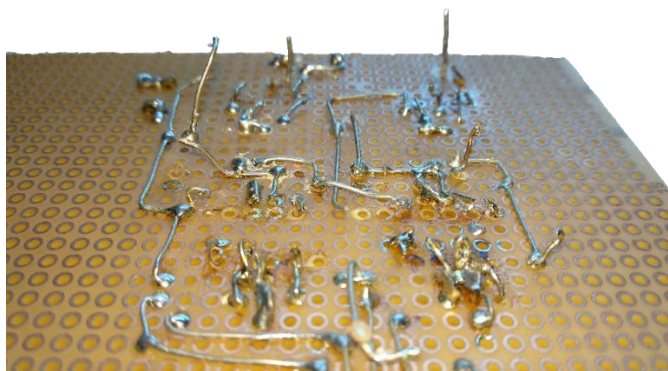


Figura 2-7 – Exemplo do estado em que se encontravam os contactos de um dos circuitos constituintes do protótipo anterior.

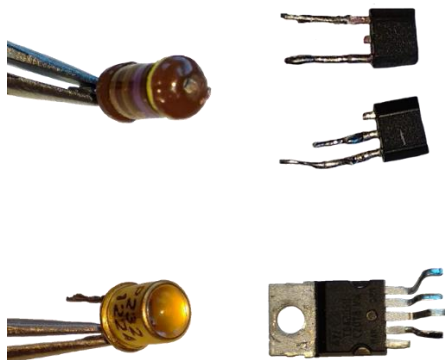


Figura 2-8 – Exemplos de alguns componentes inutilizados pela falta de contactos ou por avaria.



Figura 2-9 – Estado do suporte do solenoide utilizado no protótipo anterior.

Apesar de ser um grande contratempo, estas limitações possibilitaram/impuseram um redesenho de alguns dos circuitos e uma remodelação dos suportes do manómetro. Uma análise completa de cada circuito bem como das alterações face aos anteriores será estudada no capítulo seguinte. Todas as modelações tridimensionais dos suportes e novas peças serão também apresentadas e devidamente justificadas.





### 3. Protótipo Proposto – Subsistemas e Protótipo Final

Este capítulo descreve o funcionamento de cada circuito que constitui o SRG, bem como a montagem do manómetro em si.

Assim, cada uma das seguintes secções apresenta o princípio de funcionamento do circuito, qual o circuito implementado, justificações de alterações (se alguma houver), a análise do comportamento do circuito em diferentes fases de funcionamento, comparações com o esperado, limitações e possíveis futuras alterações.

#### 3.1. Sistema de levitação vertical

##### Funcionamento – Levitação Macro Estável

A principal característica do SRG é sem dúvida o uso de levitação magnética para a obtenção de valores de pressão. Esta levitação pseudo estável não é de todo trivial e demorou várias décadas até tomar a forma do manómetro que ainda hoje é usado (desde uma das primeiras propostas em 1937 por Holmes [8], até às propostas feitas por Fremerey em 1984 [2] (Figura 3-1)).

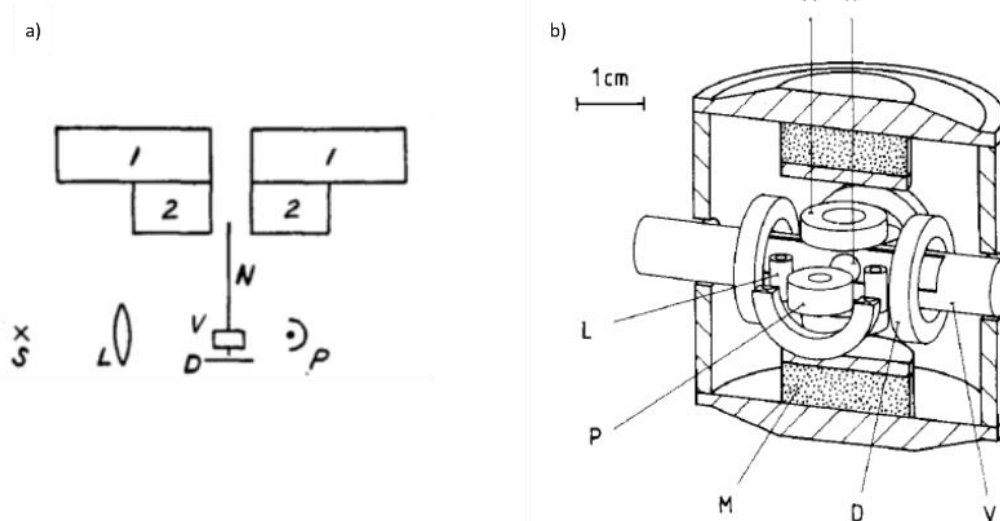


Figura 3-1 – Comparação entre a), a primeira proposta de Holmes para um sistema com levitação magnética [8] e b), o SRG proposto por Fremerey [2]. Em a) observa-se 1 e 2 – Solenoide de levitação; S – fonte de luz; L – lente focal; P – uma célula fotossensível; e o rotor V composto por N – Vara e D – disco de amortecimento. Em b) consta A – Solenoide de suspensão vertical; M – Ímã permanente; P – Bobine de arranque; L – Bobine de estabilização horizontal; D – Bobine de aceleração do rotor; V – Encapsulamento para vácuo; e R – Rotor.

Almeida faz uma análise muito completa na sua introdução, sobre os vários tipos possíveis de levitação magnética e as suas limitações, mas concluiu que apenas se justifica o desenvolvimento do protótipo com um sistema de controlo por realimentação [1]. Isto deve-se ao facto de um equilíbrio estável num campo magnético estático não ser possível, segundo o teorema de Earnshaw. Assim, para atingir o equilíbrio desejado, é necessário uma ação contínua sobre o sistema, dependente da deslocação do rotor em relação à sua posição de equilíbrio.

Uma vez que existem duas forças opostas a atuar sobre o rotor, sem a imposição de um amortecimento neste sistema ocorrem oscilações, podendo ser feita a analogia com um oscilador harmónico simples. Para evitar esta vibração do rotor, o sistema é amortecido e pode ser descrito pela seguinte expressão, onde  $m$  é a massa do rotor,  $z$  a distância do rotor ao solenóide,  $h$  a constante de amortecimento,  $k$  a constante da força de reposição (constante de mola) e  $g$  a aceleração gravítica.

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + h \frac{dz}{dt} + kz = mg \quad 3.1$$

O deslocamento do rotor pode ser expresso pela expressão:

$$z = -\frac{mg}{k} + Ae^{-ht} \text{sen}(\omega t) \quad 3.2$$

Onde  $A$  se refere à amplitude de oscilação, e a frequência do sistema  $\omega$  pode ser descrita por:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{h^2}{4m^2}} \quad 3.3$$

Uma vez que se pretende um sistema sem oscilação, o sistema deve ser dimensionado para se obter um amortecimento crítico, ou seja  $\omega = 0$ , o que implica que:

$$\frac{h^2}{4m^2} = \frac{k}{m} \Leftrightarrow h = 2\sqrt{km} \quad 3.4$$

Assumindo que para um circuito de realimentação a equação 3.1 toma a forma:

$$\frac{\Delta z}{2gR_1} \frac{d^2 z}{dt^2} + C_1 \frac{dz}{dt} + \frac{1}{R_1} z = 0 \quad 3.5$$

Onde  $B$  é o ganho de corrente multiplicado pela função de transferência do sensor de posição,  $R_1$  é o valor da resistência em Ohms, e  $C_1$  o valor do condensador em farad, dos respetivos componentes ilustrados na Figura 3-2.

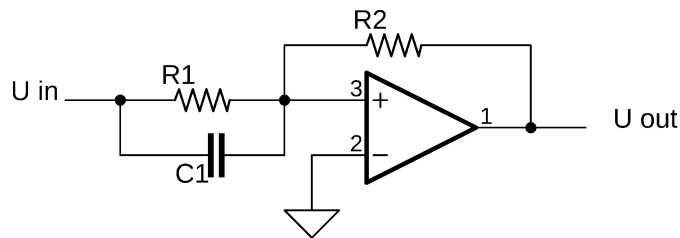


Figura 3-2 – Exemplo de um circuito de realimentação.

Substituindo os valores correspondentes na equação 3.4:

$$C_1 = 2 \sqrt{\frac{1}{R_1} \frac{\Delta z}{2gR_1}} \Leftrightarrow R_1 C_1 = 2 \sqrt{\frac{\Delta z}{2g}} \quad 3.6$$

Esta relação permite dimensionar o controlo por realimentação para a levitação magnética, especificamente a constante de tempo  $T$  do amortecimento.

$$T = R_1 C_1 \quad 3.7$$

Este controlo por realimentação consiste num circuito capaz de ler a posição vertical do rotor e responder adequadamente, aumentando ou diminuindo a intensidade do campo magnético responsável pela levitação. Significa, portanto, que a posição do rotor influencia a resposta do circuito e essa resposta influencia a posição do rotor. A evolução simplificada do sistema pode ser observada na Figura 3-3. Este processo implica que o rotor nunca se encontra verdadeiramente estável, mas sim a vibrar axialmente em torno de um ponto de equilíbrio. Esta vibração pode ser minimizada até ao ponto em que o rotor aparenta estar em repouso, através de ajustes no circuito, surgindo assim o uso do termo levitação macroscopicamente estável [8].

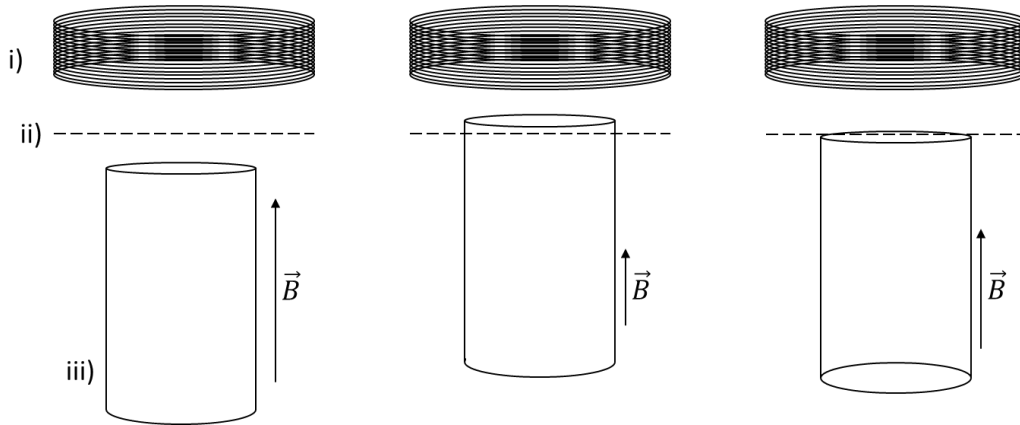


Figura 3-3 – Simplificação do princípio de funcionamento do sistema de levitação vertical com controlo por *feedback*. Pode observar-se i) – Solenoide de levitação vertical; ii) – limite de referência; e iii) o rotor, bem como a evolução da intensidade do campo magnético em função da posição do rotor.

Como se pode observar na Figura 3-3, se o rotor se encontrar abaixo da linha de referência, o circuito responde aumentando a corrente que alimenta o solenóide, aumentando assim a intensidade do campo magnético. Se o rotor ultrapassar a referência, a força atrativa gerada pelo solenóide começa a diminuir e a força gravítica obriga o rotor a afastar-se novamente da linha de referência. No caso do SRG comercialmente disponível existe também uma bobine inferior ao rotor que ajuda na estabilização e auxilia o retorno do rotor ao ponto de equilíbrio. Uma vez que o rotor se encontra novamente abaixo da referência o processo reinicia-se, aumentando de novo a intensidade do campo magnético.

Para este processo se dar como descrito, o circuito necessita de quatro componentes principais (Figura 3-4): uma componente de medição, capaz de determinar a posição relativa do rotor e a traduzir numa diferença de potencial; uma constante de tempo responsável por ditar quanto tempo o circuito deve demorar a responder à variação da posição do rotor; um amplificador de corrente que alimenta o solenoide; e finalmente um solenoide capaz de criar um campo magnético adequado para a levitação do rotor.

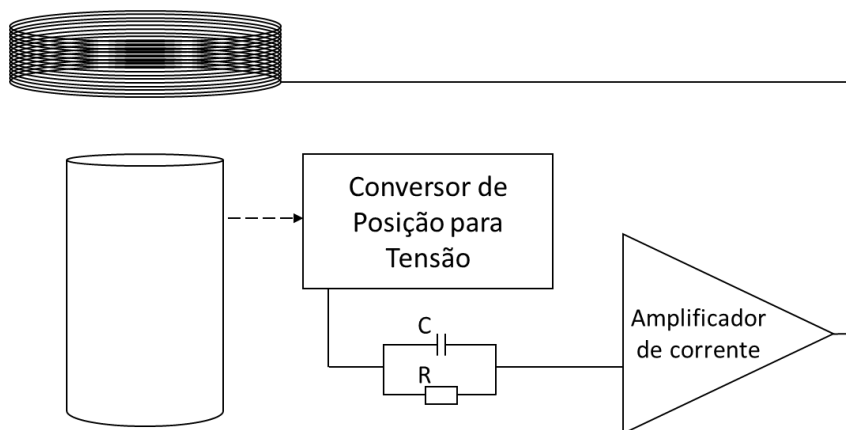


Figura 3-4 – Diagrama de um sistema de levitação por *feedback* baseado nos esquemas de Fremerey [6].

A posição relativa do rotor pode ser obtida de diversas formas, mas apenas três serão analisadas devido à sua relevância para o projeto em questão: sensores de impedância; par fototransistor-LED; e sensores de Hall.

Sensores de impedância neste contexto funcionariam com base na indutância do circuito ou, de forma mais simples, na corrente induzida pelas variações do campo magnético. Como o rotor influencia a uniformidade do campo magnético que o atravessa, o seu deslocamento provoca variações nesse mesmo campo. Uma vez relacionadas estas variações com a posição do rotor, torna-se possível determinar esta posição com base no sinal produzido pelo sensor.

Diversos sensores de impedância poderiam ser utilizados, por exemplo, Fremerey explora o uso de duas espiras simples colocadas superior e inferiormente ao rotor [6] (Figura 3-5 a)). A diferença das correntes nelas induzidas pela variação do campo possibilita a deteção da posição do rotor.

Outro sensor interessante com a mesma aplicação é o sensor de Hall. Este sensor quando alimentado com uma corrente adequada, fornece um sinal proporcional à intensidade de campo magnético que o atravessa. Almeida afirma na sua introdução a este circuito que o sensor de Hall é provavelmente a melhor opção para obter a posição do rotor para o seu protótipo (Figura 3-5 b)), mas após alguns testes iniciais, afere que esse não é o caso. Isto deve-se ao facto de que, ao adicionar o circuito de estabilização lateral e o circuito de aceleração, o campo magnético torna-

se demasiado complexo para se conseguir isolar a variação no campo que resulta da deslocação do rotor. Isto não significa que seja impossível a utilização de um sensor de impedância, mas dificulta muito a tarefa e existem alternativas mais simples para o protótipo nesta fase do projeto. Futuras iterações beneficiariam do uso de um destes sensores de impedância.

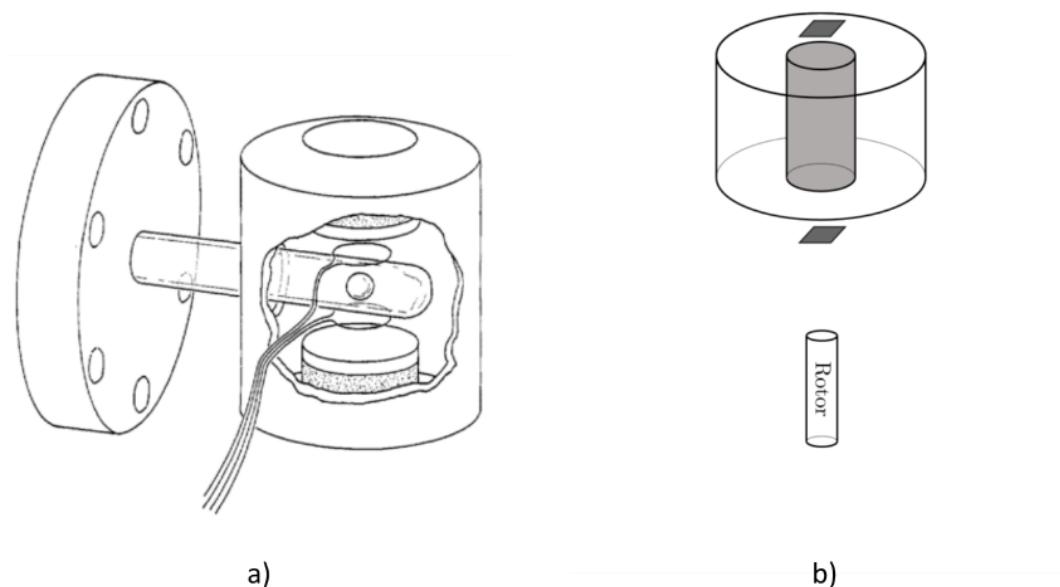


Figura 3-5 – Exemplos de utilização de sensores de impedância. **a)** Solução proposta por Fremerey com espiras simples [6]; **b)** primeiro protótipo proposto por Almeida com sensores de hall superiores e inferiores ao solenoide de levitação vertical [1]. A diferença entre os sinais deste par de sensores, seria devido à deslocação do rotor.

A alternativa utilizada por Almeida para a determinação da posição do rotor é baseada num par de fototransístor e LED de infravermelhos. Um LED responsável pela emissão de um feixe de luz infravermelha é alinhado com um fototransístor de forma a este captar o feixe. Sempre que o rotor interromper este feixe de ser captado pelo fototransístor, o sinal que ele envia ao circuito é também interrompido. A intensidade do feixe captado e, consequentemente, do sinal, é então proporcional à percentagem de feixe bloqueado pelo rotor. A Figura 3-6 ilustra esta relação entre o sinal e a posição do rotor.

Este método de deteção implica, no entanto, uma visão não obstruída do rotor. Para tal acesso ser possível teve de se utilizar uma câmara de vidro, que limita consideravelmente as possibilidades de ligação com a câmara de vácuo.

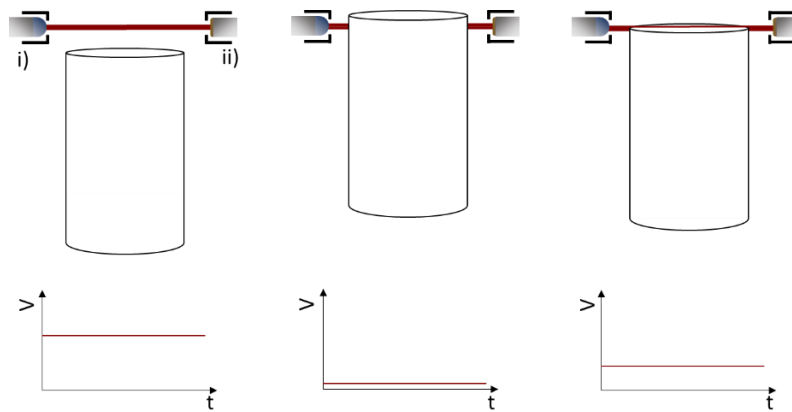


Figura 3-6 – Relação entre a percentagem de feixe bloqueado pelo rotor e o sinal produzido pelo fototransistor. i) e ii) representam respetivamente o fotodíodo e o fototransistor.

Outro componente do circuito de levitação vertical de elevada importância é a constante de tempo, ou  $T$  (eq.3.7). O condensador e resistência encarregues de definir esta constante, influenciam o amortecimento com que o circuito impõe ao sinal proveniente do sensor, de forma a evitar oscilações demasiado abruptas ou de grande amplitude.

Sendo  $R$  o valor da resistência em Ohms, e  $C$  o valor da capacidade do condensador em Farads. O ajuste deste parâmetro é essencial para uma levitação estável, uma vez que, se a constante de tempo for demasiado pequena, as variações do campo serão demasiado rápidas, criando oscilações que não são possíveis de compensar, e se  $\tau$  for demasiado alta, o campo não responderá a tempo e o deslocamento do rotor será superior ao desejado. Estas oscilações nem sempre são fáceis de distinguir e o ajuste da constante de tempo tem de ser feito por tentativa e erro.

A Figura 3-7 apresenta o esquema com o circuito utilizado para a levitação vertical. Várias alterações foram feitas ao circuito, mantendo o seu princípio de funcionamento, na tentativa de se observar melhorias na estabilidade de levitação. O circuito difere do circuito do protótipo anterior, devido a que o ajuste da constante de tempo aparenta ser menos crítico do que nos testes efetuados com o circuito proposto por Almeida. Os resultados serão discutidos no capítulo 4 e comparados com os valores anteriormente obtidos.

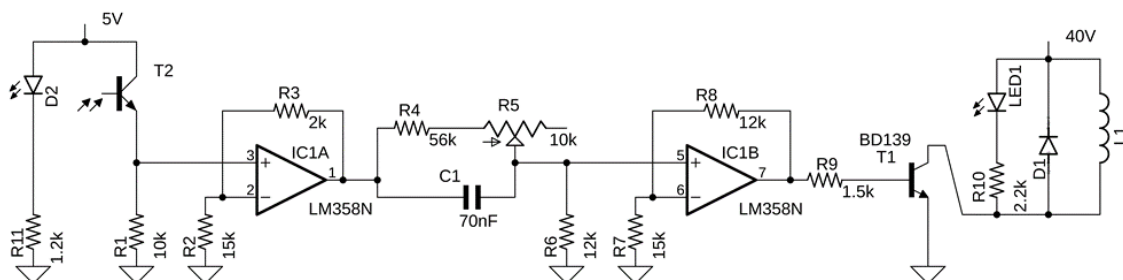


Figura 3-7 – Esquema do circuito de levitação vertical.

O LED D2 e o fototransistor T2 constituem o par de detecção acima referido, enquanto que as resistências R4 e R5, e o condensador C1 ditam a constante de tempo. O circuito integrado LM358 amplifica o sinal e alimenta-o ao transistor T1 que por sua vez regula a corrente do solenóide. O IC LM358 é alimentado com +15V. O fototransistor utilizado produz um sinal entre 0V e 5V e, por esse motivo, houve necessidade de uma escolha cuidada da resistência R11 para evitar que o feixe produzido por D2 saturasse o sinal de T2. O ganho de cada andar de amplificação do circuito é aproximadamente unitário mas na eventualidade de existir a necessidade de substituir T2, este ganho pode ser facilmente alterado de acordo com o novo componente.

Um ajuste fino da constante de tempo é possível ao variar-se o valor do potenciômetro R5, possibilitando uma melhor estabilização do rotor quando necessário. Este ajuste é essencial no arranque da levitação, uma vez que quando desligado, o rotor tende a repousar numa posição diagonal ao eixo vertical, como pode ser observado na Figura 3-8 a). Após o arranque o rotor é atraído pelo solenóide e devido à sua posição inicial, entra em vibração, Figura 3-8 b) e c).

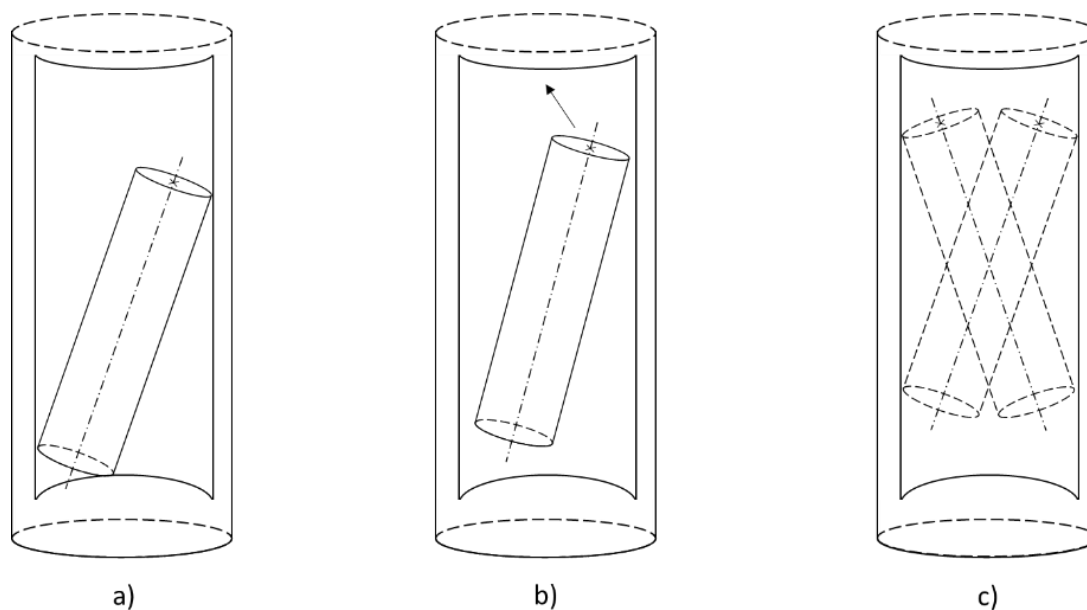


Figura 3-8 – Possível comportamento do rotor durante o arranque, devido à sua posição inicial.

Um aspeto interessante a ser estudado em futuros desenvolvimentos deste projeto, a fim de melhorar o estado inicial bem como a estabilidade total da levitação, é a presença de ímanes permanentes superiores e inferiores ao rotor.

Uma vez que o rotor se encontra suspenso superiormente pelo campo magnético, este tende a comportar-se como um pêndulo. Isso deve-se a que o campo é mais notório junto à base superior do rotor do que na outra extremidade. Para evitar este efeito, existe um núcleo ferro magnético inferior ao rotor que alonga o campo magnético para uma melhor estabilidade. A adição de ímanes permanentes pode adicionar uma estabilidade extra, com uma melhor distribuição do campo magnético.

Outra alteração que pode ser feita é a modificação do interior da câmara de vidro onde repousa o rotor, conforme se descreve na Figura 3-9. Esta alteração puramente mecânica influencia a posição do rotor durante o arranque do sistema, auxiliando a minimizar as vibrações iniciais. Para além disso, e provavelmente a maior motivação para esta alteração, será esta possibilitar a remoção do rotor para polimento da superfície ou a substituição integral do rotor.

Para este fim é necessário remover a face inferior da câmara de vidro e substituí-la por uma tampa com o interior côncavo, como ilustrado na Figura 3-9 b). O material escolhido para esta tampa teria de ser compatível com baixas pressões, para evitar a interrupção do vácuo durante o funcionamento do SRG.

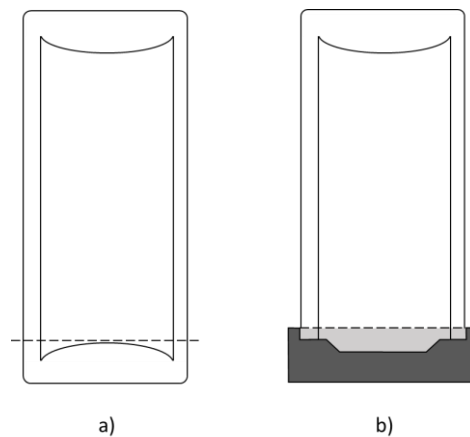


Figura 3-9 – Vista em corte de uma tampa para a câmara de vidro que possibilita a remoção do rotor do seu interior.

Apesar de se obter uma levitação aparentemente estável apenas com o sistema descrito, esta estabilização é insuficiente para o funcionamento do SRG. Assim, no capítulo seguinte apresenta-se uma análise da estabilização existente bem como um modo de a auxiliar.



### 3.2. Sistema de estabilização lateral

A estabilidade da levitação do rotor não passa apenas pela robustez do circuito de suspensão vertical, uma vez que o rotor continua a ter alguma liberdade no plano horizontal. Para além do circuito de estabilização lateral que este capítulo introduz, uma forma de ajudar a estabilização do rotor é manipular a forma do campo magnético gerado pelo solenóide de suspensão vertical.

Este campo encontra-se maioritariamente concentrado junto do núcleo do solenóide e exerce uma maior influência sobre o topo do rotor. Assim, a face inferior do rotor permanece livre para vibrar horizontalmente e o rotor pode comportar-se como um pêndulo.

Para evitar esta situação, Almeida propõem um circuito magnético de forma a alongar o campo magnético e a estabilizar a zona inferior do rotor.

A Figura 3-10 apresenta a solução proposta por Almeida e como esta influencia a forma do campo magnético. No entanto, para o protótipo que a presente tese propõe, foi retirado o suporte lateral de forma a minimizar a distorção que este causava ao campo, mas um resultado muito semelhante foi alcançado apenas com o núcleo inferior. Uma análise completa do novo dispositivo e todos os respetivos suportes é apresentada mais à frente na secção 3.5.

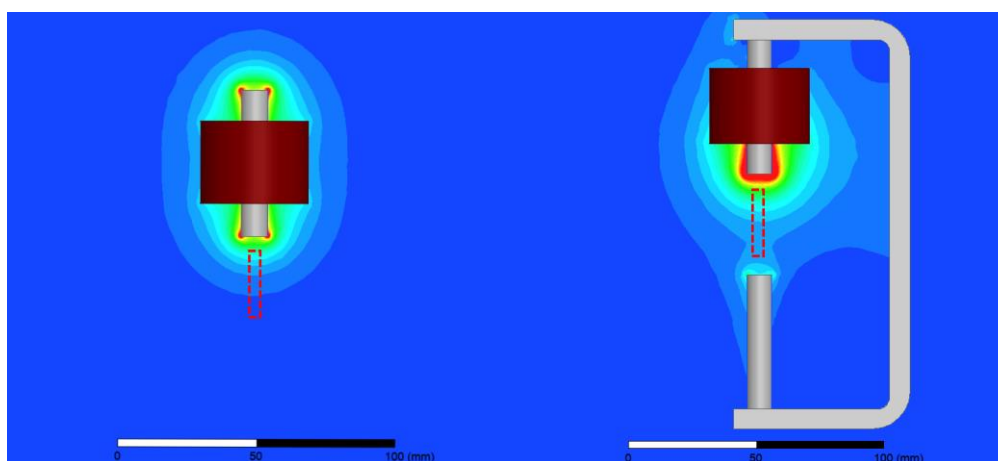


Figura 3-10 – Análise elaborada por Almeida [1] utilizando método de elementos finitos para determinar a influência de um circuito magnético no campo magnético de um solenóide.

Esta configuração aumenta a estabilização passiva do rotor, mas não é suficiente. Assim, surge a necessidade de uma estabilização ativa, capaz de identificar vibrações do rotor e de as amortecer.

O sistema proposto foca-se na estabilização no plano horizontal sendo que, quando o rotor entra em vibração, bobinas colocadas paralelamente ao rotor atraem-no de volta à sua posição de equilíbrio. Baseado no SRG de Fremerey [2], Almeida começa com um sistema de dois pares de bobinas para estabilizar a extremidade inferior do rotor (Figura 3-11 (a)), mas rapidamente afere que estas são insuficientes. Assim, no seu protótipo final constam 4 pares de bobinas, dois responsáveis pela estabilização do topo do rotor, e dois pela extremidade inferior (Figura 3-11 b)).

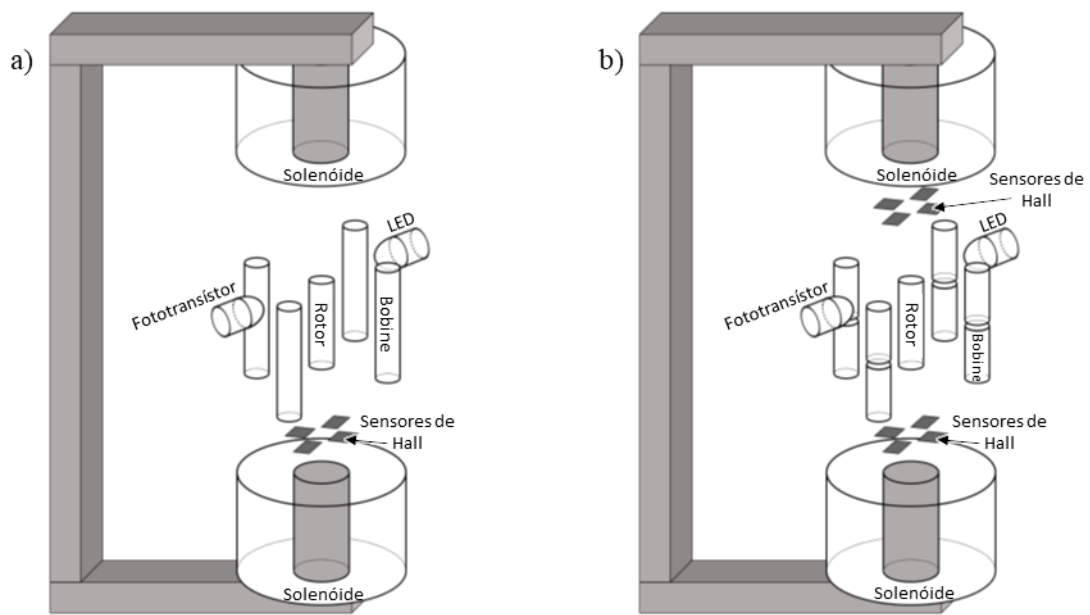


Figura 3-11 –Diagrama adaptado da primeira proposta de Almeida [1] com 4 bobines laterais, focado na estabilização da extremidade inferior do rotor a) e proposta final com 8 bobines laterais b).

Este sistema, à semelhança do sistema de levitação vertical, faz uso de um controlo por realimentação em que a posição do rotor determina a resposta do circuito, e são utilizados sensores de Hall para a determinação da posição horizontal de cada extremidade do rotor.

A evolução simplificada da posição do rotor e da corrente que alimenta as bobines durante uma vibração indesejada pode ser observada na Figura 3-12. Para evitar uma ilustração demasiado complexa, a figura representa apenas a resposta de um par de bobines.

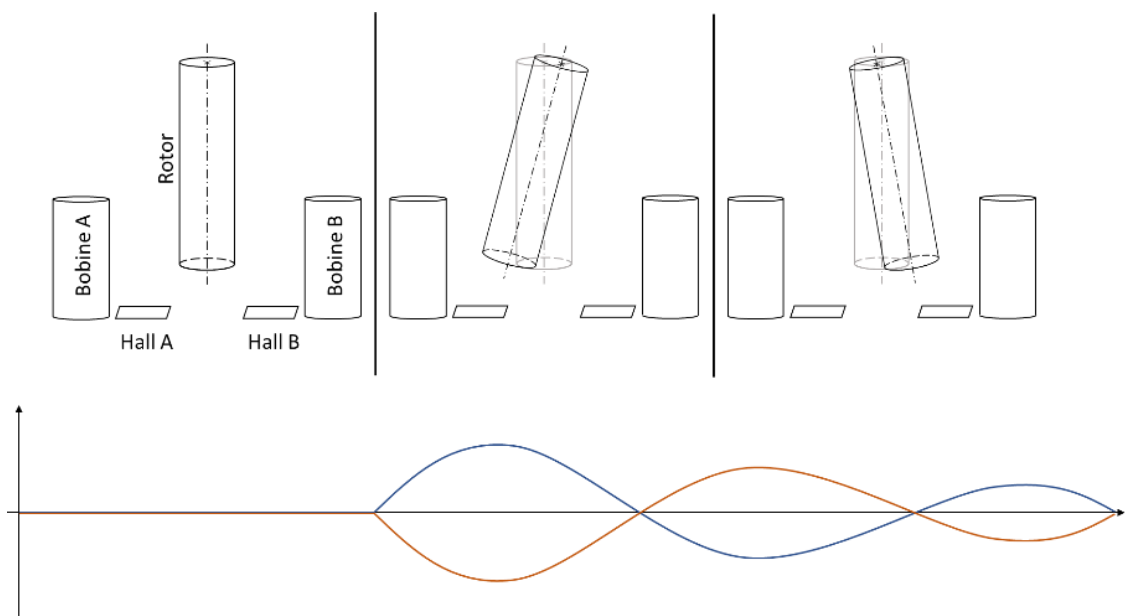


Figura 3-12 – Evolução da estabilização horizontal do rotor por um par de bobines. As correntes que alimentam a bobine A (Laranja) e a bobine B (Azul) são simétricas uma vez que, se o rotor se aproximar de uma das bobines, obrigatoriamente afasta-se da oposta.

Apresenta-se de seguida um diagrama do sistema de estabilização lateral que Almeida desenvolveu para o seu protótipo (Figura 3-13) dividido em quatro blocos principais.

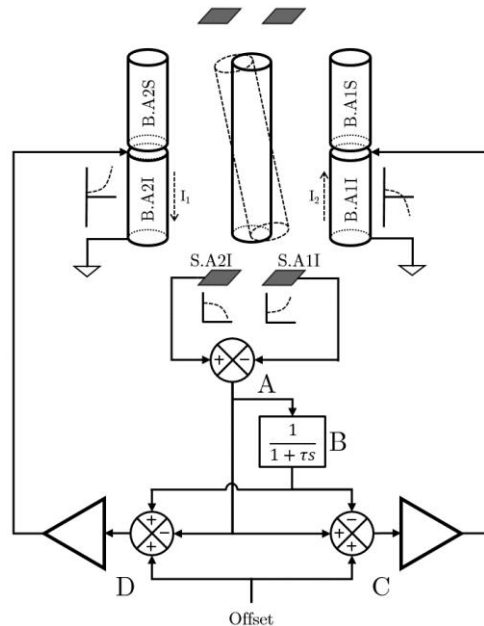


Figura 3-13 – Diagrama de um par de sensores de Hall e respectivas bobines [1].

Dois sensores de Hall colocados simetricamente um ao outro em relação ao rotor constituem um par, responsável pela estabilização nesse eixo. Assim, a diferença entre os sinais produzidos pelos sensores traduz a posição do rotor. Esta diferença é obtida na primeira secção do circuito (bloco A), passando de seguida por um filtro passa baixo (B) cuja função é devolver um sinal dependente da diferença das características entre os dois sensores de Hall.

Idealmente quando expostos ao mesmo campo e simetricamente colocados, os sensores de Hall deveriam produzir exatamente o mesmo sinal, no entanto, devido a ligeiras diferenças de fabrico e assimetrias no posicionamento em relação à posição de equilíbrio do rotor, este filtro devolve um sinal DC, ligeiramente acima de zero.

Este sinal é então subtraído ao primeiro, de forma a obter-se a verdadeira posição do rotor, amplificado positivamente para alimentar a bobine do qual o rotor se afasta (C), e negativamente para alimentar a bobine do qual o rotor se aproxima (D). Este processo assegura que, quando o rotor apresenta alguma oscilação, o sistema responde amortecendo essa mesma oscilação.

Para além desta estabilização ativa, existe também um *offset* adicionado a todas as bobines laterais, de forma a ajudar na estabilização passiva (Figura 3-14 a). Ao contrário do sinal proveniente da posição do rotor, este *offset* não é simétrico para cada bobine, pois a sua função é alongar o campo magnético, à semelhança da adição do núcleo abaixo do rotor como descrito no início deste capítulo. Apesar de, teoricamente, este *offset* ajudar a estabilização passiva, observou-se que também limita a corrente que alimenta as bobines laterais, e foi mantido a zero. Almeida conclui que este *offset* não melhora os resultados de estabilização e assim propõe-se que seja

retirado, no entanto, no presente protótipo ainda consta o circuito de *offset* para possibilitar testes futuros.

A última componente deste sistema é um circuito de atraso (Figura 3-14 b) responsável pelo controlo do gate dos MOSFETs utilizados para alimentar as bobines laterais. Este circuito liga o sistema de estabilização lateral após um tempo determinado (atraso) para evitar que seja posto sob o *stress* de picos de corrente oriundos das oscilações erráticas iniciais, descritas no capítulo anterior.

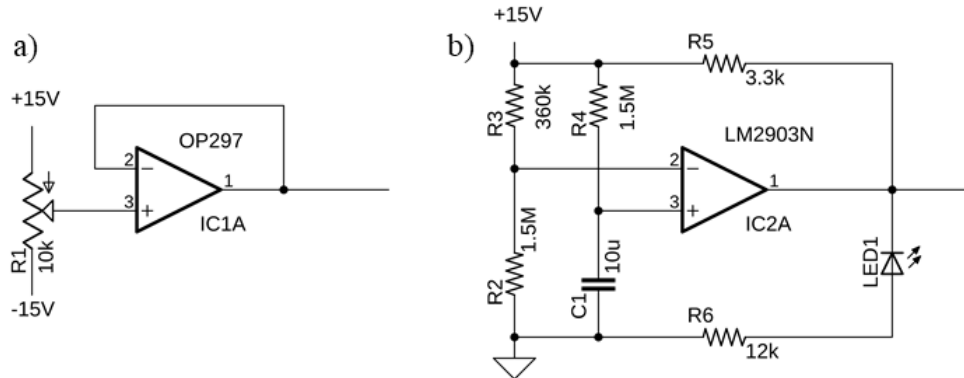


Figura 3-14 – Esquemas dos circuitos de *Offset* a) e de atraso b) que auxiliam o circuito de estabilização lateral.

O esquema do circuito de estabilização lateral acabou por não sofrer qualquer alteração (face ao proposto por Almeida), sendo que a única inovação feita foi integrar todo o circuito em placas PCB. Este era o único circuito que Almeida utilizava em *breadboards*, possivelmente devido à sua extensão e complexidade, mas uma vez que é um sistema crítico para o bom funcionamento do protótipo, justifica-se soldar o circuito na totalidade. Evitou-se assim o uso de *breadboards*, uma vez que estas podem introduzir ruídos e maus contactos.

Pode observar-se na Figura 3-15 o subsistema correspondente a um par de sensores de Hall, também este dividido em quatro blocos correspondentes aos da Figura 3-13. O circuito completo pode ser observado na Figura 3-16.

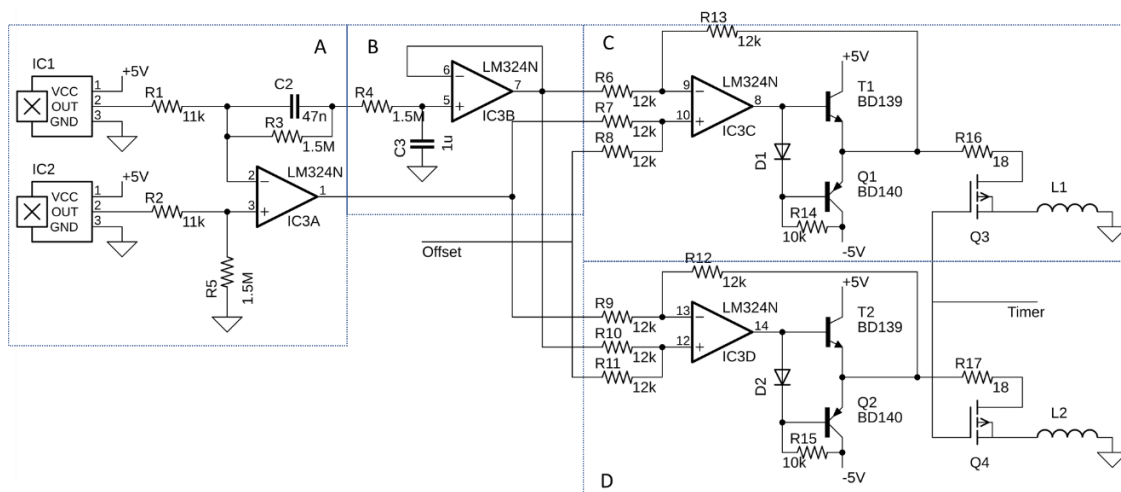


Figura 3-15 – Subsistema de estabilização lateral correspondente a um par de sensores de Hall.

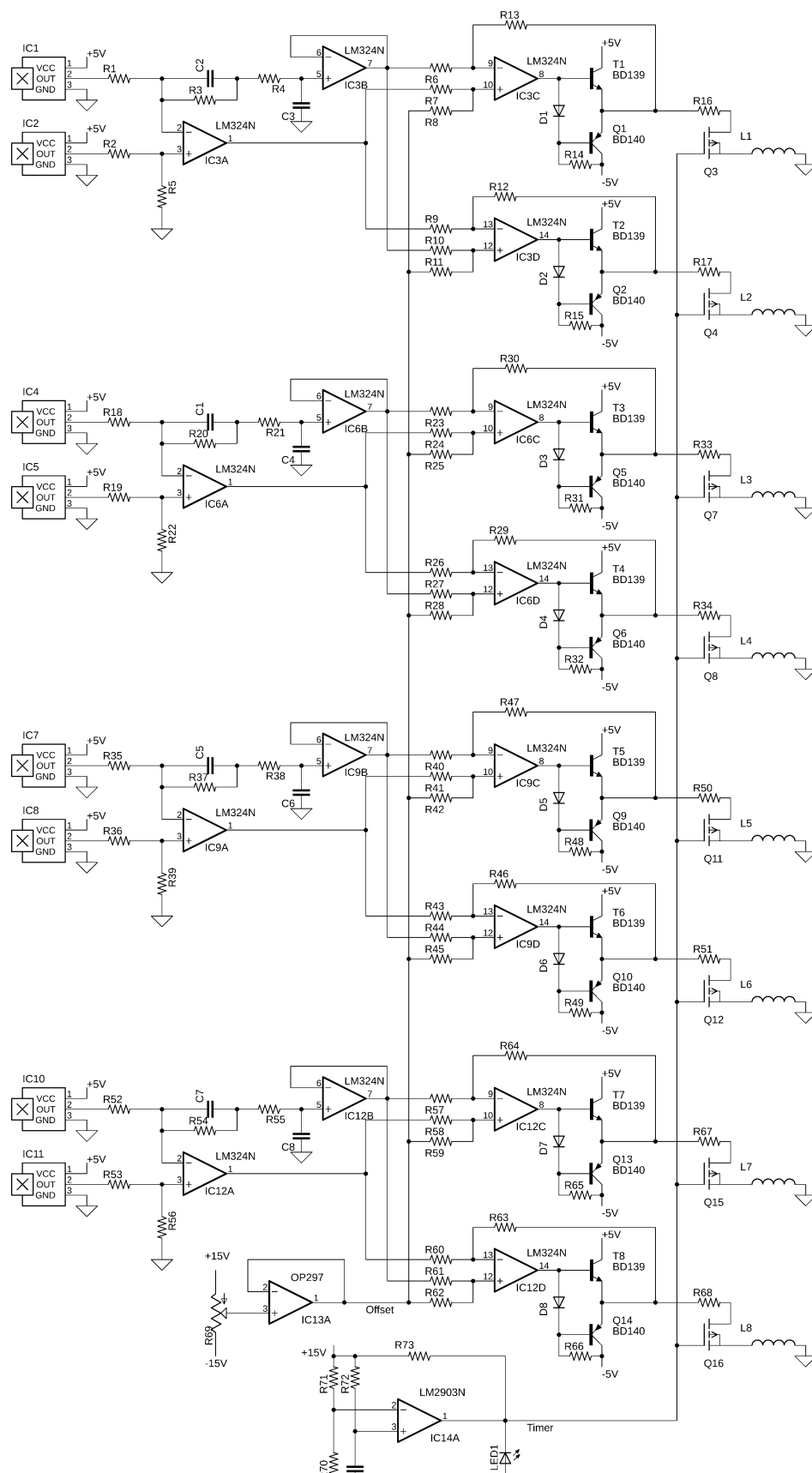


Figura 3-16 – Esquema do circuito completo de estabilização lateral.

Mencionaram-se várias vezes vibrações que necessitam ser atenuadas, mas ainda não se discutiu a sua origem. Excluindo as perturbações iniciais mencionadas no capítulo 3-1 ou perturbações exteriores ao sistema, a maioria das oscilações do rotor devem-se às dificuldades da sua aceleração angular. O processo de aceleração, bem como as dificuldades inerentes, são descritos em pormenor no capítulo seguinte, onde se introduz o sistema de aceleração do rotor.

### 3.3. Sistema de aceleração do Rotor

A aceleração radial do rotor é possível devido à existência de quatro bobines laterais, ligadas em pares e alimentadas por uma corrente alternada, que criam um campo magnético perpendicular ao campo da levitação do rotor. Este campo varia em sentido e direção, e induz correntes de eddy, que por sua vez induzem o campo magnético próprio do rotor. O campo próprio do rotor é síncrono com o campo oriundo das bobines, mas, devido à sua remanescência, tem uma diferença de fase.

O binário que provoca a rotação do rotor provém da tendência dos dois campos magnéticos se alinharem (campo oriundo das bobines, e o campo próprio do rotor). Esta rotação é por sua vez assíncrona em relação à variação dos campos. De forma a facilitar a compreensão do comportamento dos campos e do rotor, a Figura 3-17, ilustra a direção do campo gerado pelas bobines ( $B_B$ ), do campo induzido no rotor ( $B_R$ ), e a variação radial da posição do rotor (R). Este esquema é meramente exemplificativo, e o desfasamento entre os campos não é necessariamente  $90^\circ$ .



Figura 3-17 – Comportamento do campo magnético produzido pelas bobines de aceleração e do campo induzido no rotor.

As bobines são alimentadas duas a duas, por uma corrente alternada que causa a rotação do campo como observado na figura. Por sua vez, o campo induzido tem tendência a permanecer durante um curto período de tempo no rotor, causando o atraso deste em relação ao campo  $B_B$ , ou seja, a fase que se observa entre os dois campos. Este desfasamento influencia a intensidade do campo induzido, assim como a relação entre a velocidade angular do rotor e a dos campos. Esta relação denomina-se *slip*,  $s$ , e pode ser expressa segundo a equação 3.8.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad 3.8$$

Onde a velocidade do rotor é dada por  $n$ , e a velocidade dos campos é dada por  $n_1$ . Quanto maior for a velocidade do rotor, e consequentemente menor for o *slip*, maior será a intensidade das correntes de eddy e do campo induzido no rotor.

Outra forma de averiguar que a velocidade angular do rotor influencia a intensidade das correntes de eddy, é compreender a dependência temporal destas correntes. Uma vez que a origem

das correntes de eddy é por indução devido ao campo magnético variável do sistema de aceleração, recorre-se à lei de indução de Faraday.

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}\Phi_B \quad 3.9$$

Segundo esta lei, a força eletromotriz induzida é igual ao negativo da variação no tempo do fluxo magnético. Esta dependência temporal pode ser relacionada com a frequência do campo magnético. Estas relações podem vir a ser relativamente importantes uma vez que as correntes de eddy já foram identificadas anteriormente como um dos principais obstáculos a ultrapassar.

### Circuito do sistema de aceleração

O princípio de funcionamento até agora descrito é análogo aos dos motores por indução, e este facto levou a que o protótipo precedente utilizasse um circuito integrado (IC) típico para estes motores. Assim, o circuito que controlava as bobinas fazia uso do IC L6228, que, com um sinal de *clock* e sinais de entrada TTL (*Transistor to Transistor Logic*) para controlar o tipo de onda e sentido de rotação, é capaz de produzir duas correntes desfasadas entre si para a alimentação das bobinas. A forma teórica destas correntes, segundo a folha de dados (*datasheet*) deste IC [13], pode ser observada na Figura 3-19. O circuito típico que acompanha este IC pode ser observado na Figura 3-18.

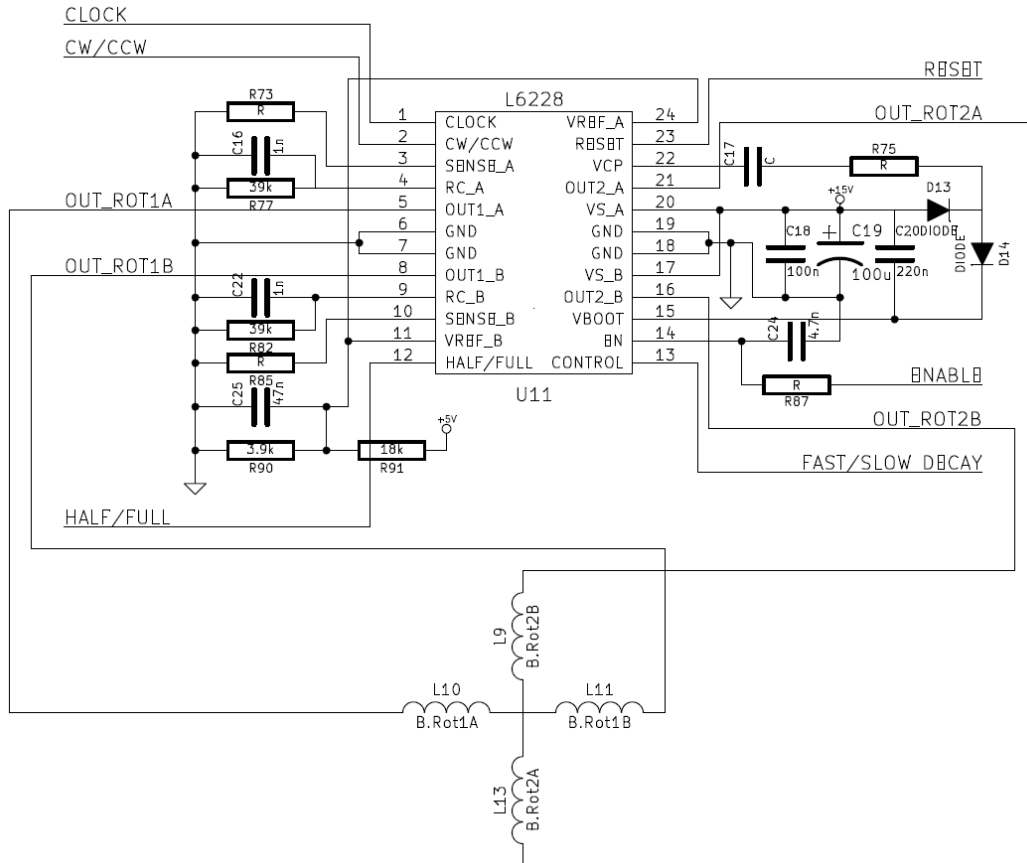


Figura 3-18 – Esquema do circuito de aceleração utilizado por Almeida [1].



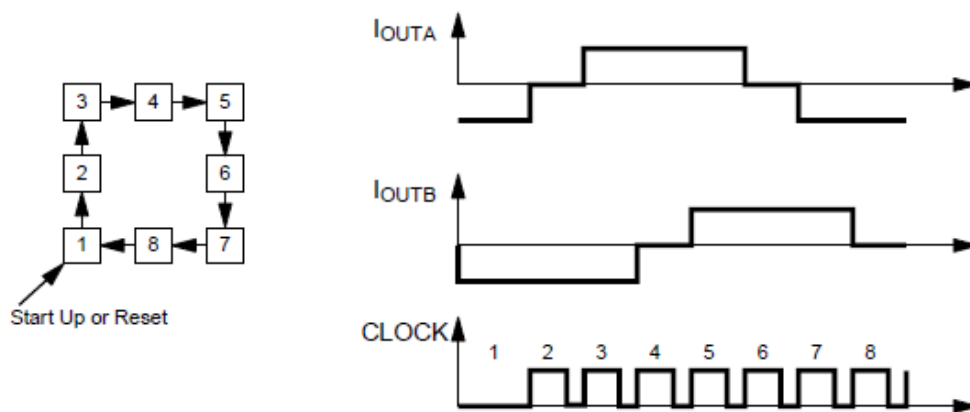


Figura 3-19 – Correntes típicas que alimentam as bobinas de rotação.

Este é um circuito relativamente complexo, que permite uma grande diversidade de formas de onda, ambos os sentidos de rotação para o rotor, e frequência do campo magnético dependente da frequência do *clock*. Uma vez que a frequência máxima de operação deste IC é cerca de 100kHz, e que o período da onda escolhida demora 8 períodos do *clock*, seria de esperar um campo magnético com uma frequência perto dos 12,5kHz.

Almeida apresenta na sua dissertação uma frequência de aproximadamente 8kHz para o campo magnético, com um *clock* (proveniente de um gerador de sinal) de aproximadamente 70kHz, ligeiramente abaixo do máximo esperado, em virtude de que, para frequências perto do limite, os resultados tendiam a ser instáveis.

De facto, durante os testes deste circuito para a presente tese, os resultados foram sempre muito pouco satisfatórios. As alimentações das bobinas de aceleração tinham muito de ruído que interferia significativamente com os circuitos de levitação e de estabilização, a forma do sinal era deformada em relação ao esperado e a rotação do rotor era inconsistente (Figura 3-20). Havia também um problema de aquecimento do IC que podia ser a causa de algumas das dificuldades descritas. Mesmo depois de devidamente soldado numa placa PCB com dissipadores de calor, os problemas persistiram e eventualmente o IC deixou de funcionar por completo. Surgiu assim a necessidade de encontrar uma alternativa ao circuito de aceleração com o mesmo princípio de funcionamento.

### Sinal do circuito de aceleração

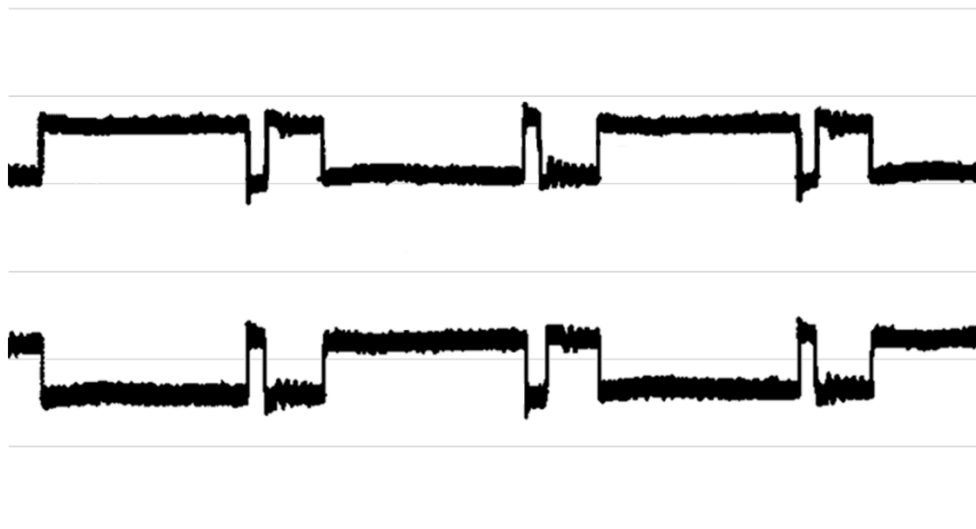


Figura 3-20 – Sinal à saída do circuito de aceleração correspondente ao *Output A* e *B* da Figura 3-19. Pode observar-se uma deformação severa do sinal em relação ao esperado teoricamente.

Adquirir novos ICs iguais ao descrito não foi possível uma vez que o L6228 é um componente que se encontra descontinuado pelos fabricantes [14]. Assim a alternativa encontrada foi utilizar um IC L293D controlado por um microcontrolador Arduino Uno. Com esta alteração surgiram algumas limitações, mas foi também possível obter resultados muito satisfatórios e ultrapassar algumas das dificuldades anteriores.

A primeira vantagem desta alternativa é a sua simplicidade, uma vez que o controlo é digital e o IC é desenhado especificamente para ser utilizado com um microcontrolador. A complexidade da eletrónica necessária para utilizar este IC diminuiu consideravelmente (Figura 3-21).

O código necessário para o controlo deste circuito está disponível em Anexo (Figura 7-1) e é extremamente simples e eficiente, uma vez que faz uso de uma biblioteca já otimizada para o controlo deste IC (Stepper.h).

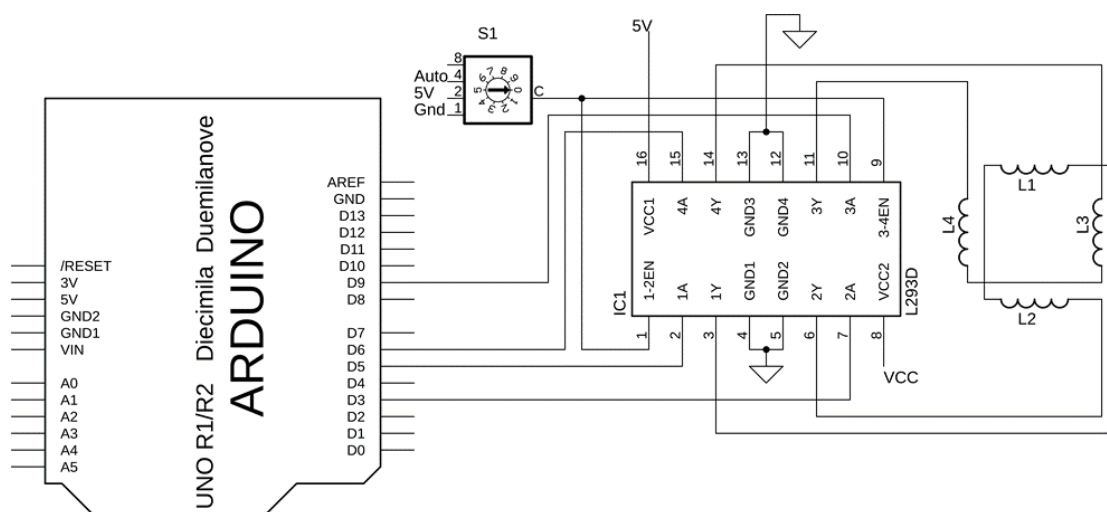


Figura 3-21 – Circuito de aceleração do rotor.

Este circuito conta com dois tipos de  $V_{cc}$  diferentes, um de 5V dedicado a lógica (TTL) e outro de 10-12V dedicado ao fornecimento de corrente para a alimentação das bobinas.

Em relação ao IC, os pinos 2, 7, 10 e 15 servem como entrada, recebendo o sinal proveniente do Arduino. O IC controla o ganho de corrente e a alimentação das bobinas é feita através dos pinos 3, 6, 11 e 14. Os pinos 1 e 9 controlam os *enables* do circuito, permitindo ligar e desligar a aceleração dependendo do seu valor. O facto de que o estado do circuito pode ser controlado por estes *enables* permite que o controlo possa ser feito digitalmente.

Foi também possível alterar a forma das ondas das correntes que alimentam as bobinas de aceleração (Figura 3-22). Esta nova forma é mais simples e, apesar de apresentar um pico indesejado no início de cada onda, a aceleração do rotor resultante deste sistema é muito satisfatória.

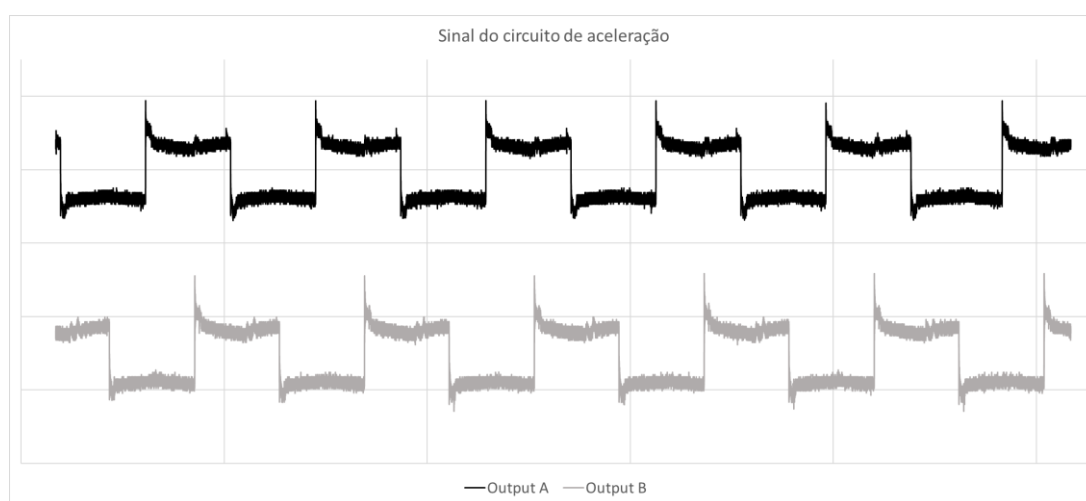


Figura 3-22 – Novo sinal de *output* do circuito de aceleração.

Como seria expectável, o problema de temperatura não se resolveu apenas com a substituição do IC, uma vez que o próprio princípio de funcionamento exige uma intensidade de corrente suficiente para que a acumulação de calor seja inevitável.

Assim, para maximizar a dissipação, foi maquinado um encapsulamento metálico para o IC como ilustra a Figura 3-23, baseado nas indicações da datasheet respetiva. Este dissipador encontra-se soldado às patas 4, 5, 12 e 13 do IC (*Ground*), onde a acumulação de calor é maior. Adicionou-se ainda um dissipador ao próprio circuito que se pode observar na Figura 3-24, conectado ao *Ground* do circuito. Ainda que com testes preliminares, foi possível observar uma descida da temperatura do IC, em modo de operação, de valores superiores a 80° para valores inferiores a 50°.



Figura 3-23 – Dissipador aplicado ao IC L293D.

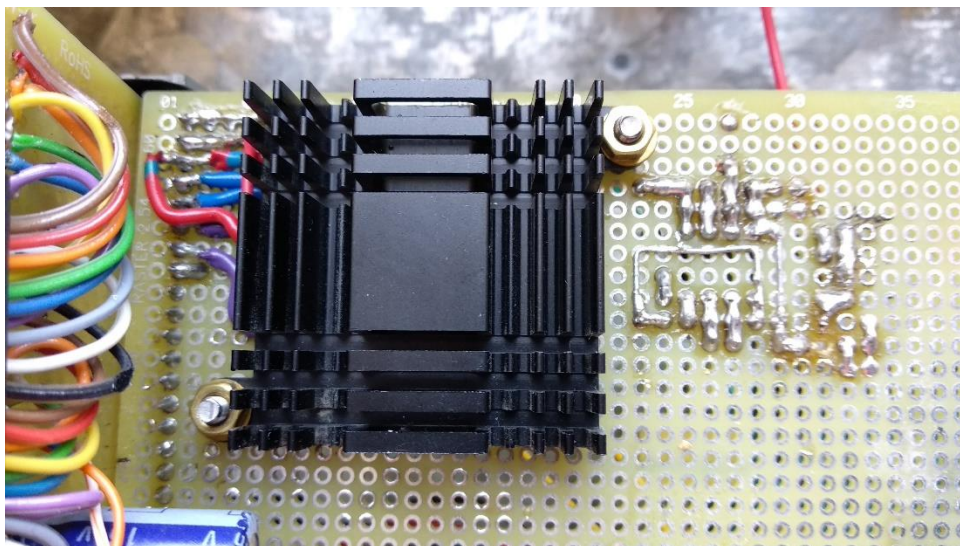


Figura 3-24 – Dissipador aplicado diretamente no Ground do circuito.

A utilização do novo IC L293D trouxe também uma limitação em relação à frequência da rotação do campo magnético. Uma vez que para o controlo do novo circuito se utiliza um microcontrolador, a frequência de operação irá depender dos limites deste. Testaram-se um Arduino Uno e um Arduino Mega, com os quais foi possível atingir uma frequência para o campo magnético de 5.8kHz.

Apesar de ser um decréscimo significativo dos 8kHz atingidos com o protótipo anterior, esta frequência é suficiente para excitar a rotação do rotor até à velocidade desejada (400Hz). A limitação advém do facto de que, segundo a relação estabelecida anteriormente pela equação 3.8 e pela influência do *slip* no campo do rotor, quanto menor a frequência do campo produzido pelas bobines, maior a intensidade das correntes de eddy.

A influência negativa das correntes de eddy é sem dúvida uma dificuldade a superar, mas, a maior limitação que este sistema enfrenta é independente do circuito que se utilize para a aceleração do rotor. Esta limitação surge sob a forma de uma ressonância do sistema durante a aceleração do rotor.

### A Limitação do Sistema – Um problema de ressonâncias

Análogo a um sistema de mola-peso, o presente protótipo tem uma ressonância própria, observável durante a aceleração do rotor. Após atingir cerca de 12Hz, inicia-se uma vibração angular do rotor que provoca colisões com as paredes do encapsulamento de vidro, forçando a parar o processo de aceleração. Esta ressonância depende das características do sistema. Almeida propõem que, para ultrapassar este obstáculo, se altere temporariamente as características do sistema de forma a acelerar o rotor para além da frequência de ressonância. Na analogia com um sistema de mola-peso, esta alteração passaria por conseguir modificar a constante de mola do sistema, substituindo a mola usada, ou adicionando uma mola extra.

Almeida faz uso de uma bobine vertical inferior ao rotor, que se encontra ligada apenas no início do processo de aceleração. Enquanto esta bobine se encontra ligada, a frequência de ressonância passa a ser perto de 14Hz, o que permite ultrapassar o limite anterior de 12Hz. Após o rotor atingir uma frequência de rotação superior ao limite inicial e inferior ao novo limite, a nova bobine vertical pode voltar a ser desligada, do que resulta que a frequência de ressonância já se encontre ultrapassada e o rotor é livre para continuar a acelerar. Existe outra ressonância perto de 800Hz, no entanto, uma vez que a frequência de operação do SRG é de 400Hz, não existiu a necessidade de a ultrapassar.

Este processo para contornar a ressonância própria do sistema é extremamente engenhoso e acabou por ser utilizado também no protótipo atual sem grande alteração. Infelizmente, devido à dificuldade de deteção da rotação do rotor para baixas frequências (que será discutida no próximo capítulo), o processo de ligar e desligar a bobine inferior tem de ser manual. No entanto, após se atingir frequências mais altas de rotação, o controlo da aceleração pode passar a ser totalmente automático.



### 3.4. Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados serve essencialmente dois propósitos, o controlo do sistema de aceleração, e o cálculo da pressão em função da taxa de desaceleração. Tal como descrito no processo de funcionamento deste manómetro, o rotor só deve ser acelerado até uma velocidade bem determinada, momento a partir do qual o rotor deixa de ser forçado a acelerar e, sujeito ao atrito resultante do gás na câmara, o rotor começa a abrandar. O momento no qual o sistema de aceleração é desligado, é determinado pelo sistema de aquisição de dados, conforme a frequência atual do rotor.

Usou-se como referência para a frequência limite a frequência de operação de um Spining Rotor Gauge 2 de tipo esférico da MKS [5], que opera a 400Hz. A Figura 3-25 ilustra os diferentes modos de operação do sistema de aquisição de dados, dependentes da frequência do rotor.

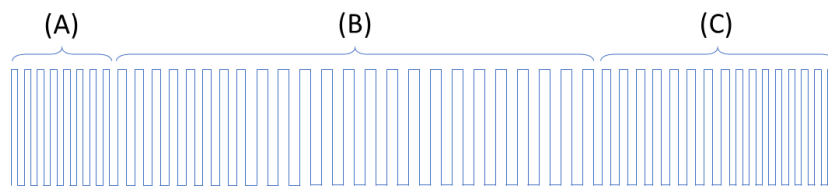


Figura 3-25 – Gráfico genérico da frequência de rotação do rotor com três fases de operação.

O sistema de aquisição de dados permanece em constante modo de leitura de frequência até o rotor atingir 400Hz (A), momento após o qual a aceleração é desligada e o rotor começa a abrandar. Os conjuntos de leituras necessários são então executados em sequência após os quais os cálculos de pressão são efetuados (B). Os cálculos são efetuados após as leituras, de modo a evitar perdas de informação, uma vez que estes mesmos cálculos ocupam tempo processamento. De seguida, o sistema de aquisição verifica se a frequência se encontra abaixo dos 400Hz, e determina se o rotor deve voltar a ser acelerado (C).

Todas estas decisões lógicas e cálculos são efetuados por um microcontrolador Arduino Uno, cujo código pode ser consultado em anexo (Figura 7-2). Não deve ser utilizado o mesmo Arduino que foi utilizado para o sistema de aceleração, uma vez que, adicionar mais instruções ao controlo de aceleração, que já se encontra a trabalhar no seu limite máximo, faz com que a frequência de aceleração diminua.

O sinal que traduz a rotação é obtido por um par de fototransístor e LED, que se encontram focados na superfície lateral do rotor tal como ilustra a Figura 3-26. O feixe proveniente do LED incide no rotor e o feixe refletido é captado pelo fototransístor, sendo convertido numa diferença de potencial, devidamente filtrado e alimentado ao microcontrolador.

A deteção da frequência conseguida através da leitura da superfície do rotor, tem o intuito de identificar sempre que ocorre uma revolução completa do mesmo. Isto é possível devido à refletividade da superfície ser irregular, permitindo estabelecer um padrão entre uma revolução do rotor e a luz refletida pela sua superfície.

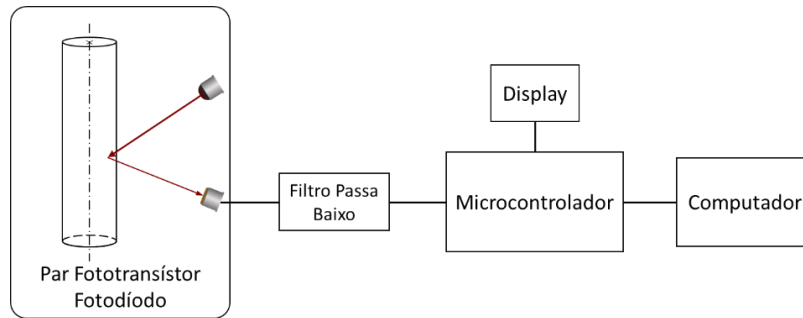


Figura 3-26 – Diagrama do sistema de aquisição de dados com o pormenor da posição relativa do fototransistor e fotodíodo em relação ao rotor.

Almeida sugere que o sinal passe por um comparador analógico com um *threshold* ajustável, possibilitando assim que o sinal recebido pelo microcontrolador seja uma onda quadrada. No entanto, durante a elaboração do presente protótipo obtiveram-se melhores resultados na detecção da frequência ao usar-se um comparador digital de janela.

Segue-se o esquema do circuito de aquisição de dados utilizado (Figura 3-27).

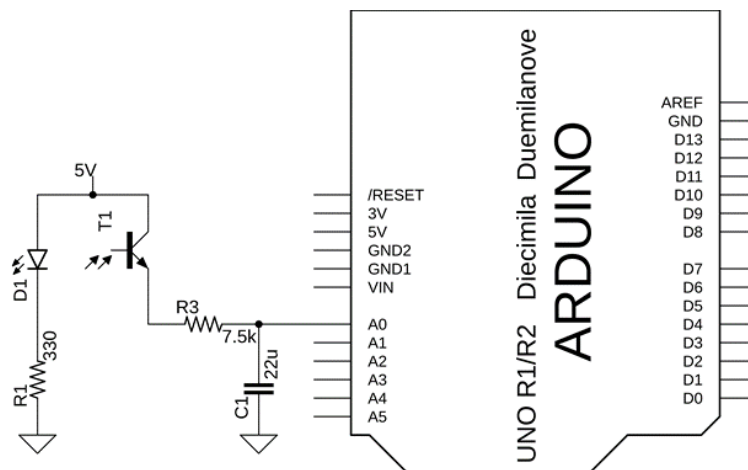


Figura 3-27 – Circuito do sistema de aquisição de dados.

Após se obter o sinal do fototransistor, é utilizado um filtro passa-baixo com uma frequência de corte de 1kHz para atenuar maiores frequências. O sinal é então fornecido ao Arduino e este determina a sua frequência.

Idealmente este sistema seria capaz de controlar o circuito de aceleração deste o arranque do rotor, mas infelizmente não é esse o caso. Esta limitação deve-se a que para frequências baixas, o sinal proveniente da reflexão da superfície do rotor não é legível o suficiente para uma correta determinação da frequência como ilustra a Figura 3-28.



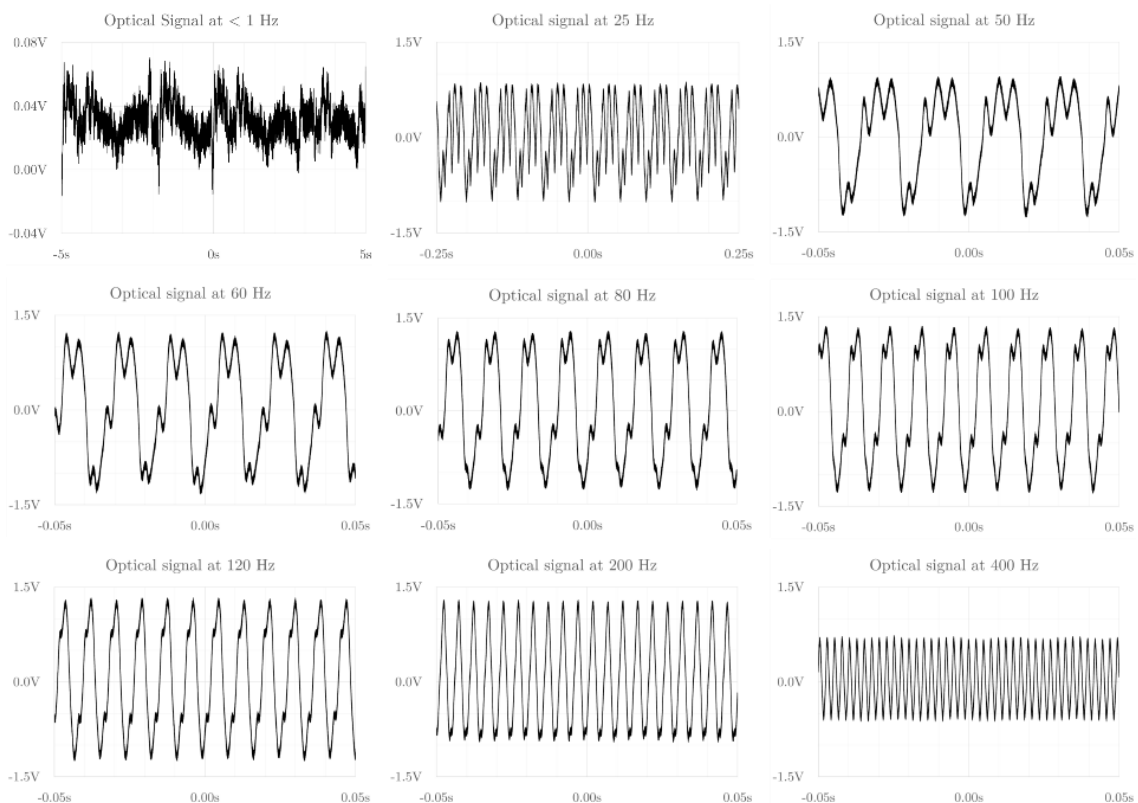


Figura 3-28 – Sinal de rotação do rotor para diferentes valores de frequência. Esquema adaptado do trabalho de Almeida [1].

Uma vez que, para valores inferiores a 75Hz o sistema de aquisição de sinal não consegue medir corretamente a frequência, o controlo da aceleração deve ser manual até ~75Hz.

Para além disso, o facto de que a ressonância discutida no capítulo anterior se encontra abaixo de 75Hz, implica que o controlo da bobine vertical inferior também deve ser manual.

Como mencionado anteriormente, o sistema de aquisição de dados é também responsável pelo cálculo da pressão. Em termos práticos isso resume-se a algumas simples linhas de código que contém a expressão que traduz a taxa de desaceleração do rotor em pressão, deduzida no capítulo 2.

Concluída a elaboração de todos os sistemas e circuitos, passa a ser possível calcular a pressão com o protótipo atual, faltando apenas compreender a montagem do dispositivo e do respetivo módulo de controlo. Assim, o seguinte capítulo apresenta a forma final do SRG proposto.



### 3.5. Montagem do Protótipo – Dispositivo e Controlo

Uma das grandes alterações introduzidas pelo presente trabalho é uma reconfiguração completa dos suportes e peças complementares do sistema.

O protótipo precedente contava com uma montagem muito sólida, no entanto, existiam algumas limitações, nomeadamente relacionadas com organização da cablagem e dos contactos, que necessitavam ser ultrapassadas.

Assim, este capítulo apresenta o novo desenho de todos os suportes, onde as posições das bobines e sensores relativamente ao rotor foram mantidas. Manter a posição dos componentes foi uma preocupação constante, uma vez que estes influenciam severamente o funcionamento do sistema.

A segunda grande alteração foi a montagem de uma caixa de controlo para o protótipo, permitindo suprimir o uso de fontes e geradores de sinal externos ao sistema. Com a construção desta caixa, foi também possível montar um sistema de arrefecimento até agora inexistente, apesar de necessário.

O principal objetivo destas alterações foi tornar o protótipo mais versátil, para futuros desenvolvimentos deste projeto. Ao longo deste capítulo apresenta-se ainda possíveis melhorias futuras, considerando a experiência obtida ao longo do desenvolvimento deste protótipo.

#### Redesenho do Dispositivo

As Figura 3-29 e Figura 3-30 apresentam o protótipo final, onde se pode observar a montagem completa, sem encapsulamento, e uma vista expandida do sistema com todas as suas peças pode ser consultada em Anexo na Figura 7-3.



Figura 3-29 – Protótipo final com o respetivo encapsulamento.

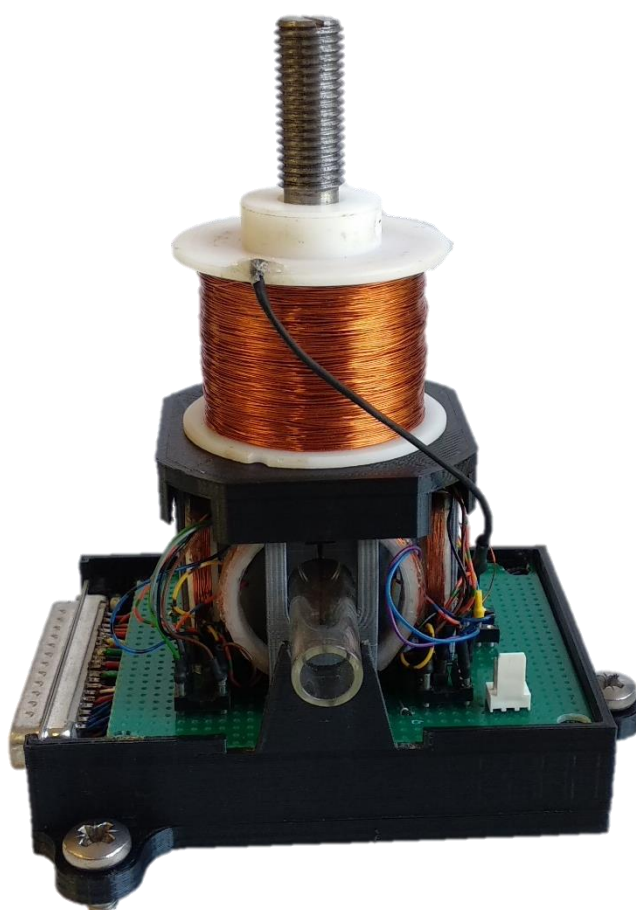


Figura 3-30 – Protótipo final sem o encapsulamento superior.

Um defeito do protótipo anterior era o facto de que o espaço reservado para os componentes (principalmente para o caso das bobines de estabilização lateral), obrigava os pinos e os cabos a

permanecerem sob tensão e em ângulos indesejáveis. Este facto levou a quebras dos contactos já discutidos.

Para além disso, o posicionamento correto dos componentes era assegurado com adesivos, como cola-quente ou cola de contacto, tornando a substituição destes componentes desnecessariamente complexa.

As novas peças foram desenhadas em SOLIDWORKS™, e obtidas por impressão tridimensional em plástico PLA, uma vez que eram demasiado complexas para serem maquinadas. Existem duas exceções à impressão 3D, os suportes dos solenóides verticais, maquinados em *Ertalon* branco, e o encapsulamento dos fototransístor e LED, maquinados em *Ertalon* preto opaco, que assegura que apenas o feixe desejado é captado, bloqueando fontes de luz indesejadas.

A Figura 3-31 apresenta os novos suportes para as bobines, sensores de Hall e para o par fototransístor – LED.

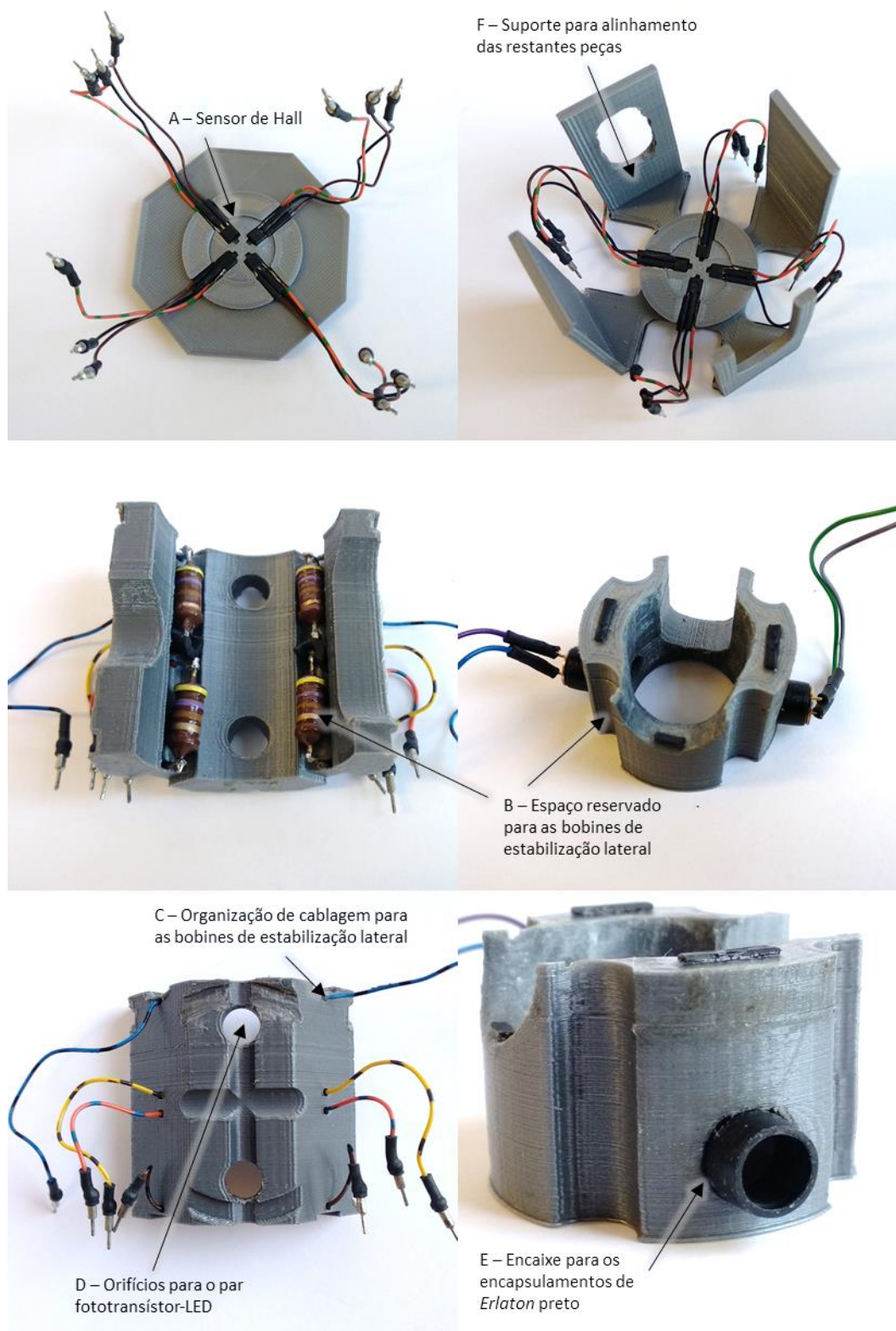


Figura 3-31 – Suportes que constituem o dispositivo.

A posição dos sensores de Hall é assegurada por um encaixe justo (A), o que evita o uso de colas ou outros fixantes. A ranhura reservada para cada sensor é suficiente para também acomodar a cablagem necessária.

As bobines de estabilização lateral encontram-se no espaço indicado por (B), enquanto que os respetivos cabos passam pelos orifícios denominados por (C). Ao contrário do protótipo anterior, esta geometria não coloca os pinos das bobines sobre *stress* mecânico, evitando-se assim quebras de contacto. Com esta geometria é necessária uma especial atenção em relação aos isolamentos entre bobines. Este pormenor pode ser observado na Figura 3-31 onde, para evitar contacto entre as duas bobines, é colocada uma borracha isolante e fixada à peça com cola de contacto. É importante que a substituição destas bobines seja relativamente simples, uma vez que bobines diferentes podem possibilitar melhorias interessantes na estabilização lateral.

Em relação ao fototransístor e fotodíodo, estes são encapsulados nos encaixes maquinados em *Erlaton* que se encontram nos orifícios (D). Estes encaixes asseguram a colimação do feixe infravermelho, e garantem o alinhamento dos orifícios (D) e (E).

A posição das bobines de aceleração é também assegurada por um encaixe justo. Importa notar que, devido ao sentido de enrolamento das bobines, o sentido em que estas são encaixadas não é aleatório.

As peças (F) e (G) trancam as restantes no seu interior, ajudando a consolidar a montagem do sistema e o alinhamento entre peças.

Para assegurar um encaixe justo, as dimensões das peças são maiores que o necessário, e um desgaste da superfície foi feito manualmente, após a impressão tridimensional. Esta necessidade de ajuste posterior é particularmente evidente para as peças que envolvem o encapsulamento de vidro. A montagem de todas as peças até agora descritas encontra-se ilustrada na Figura 3-32.

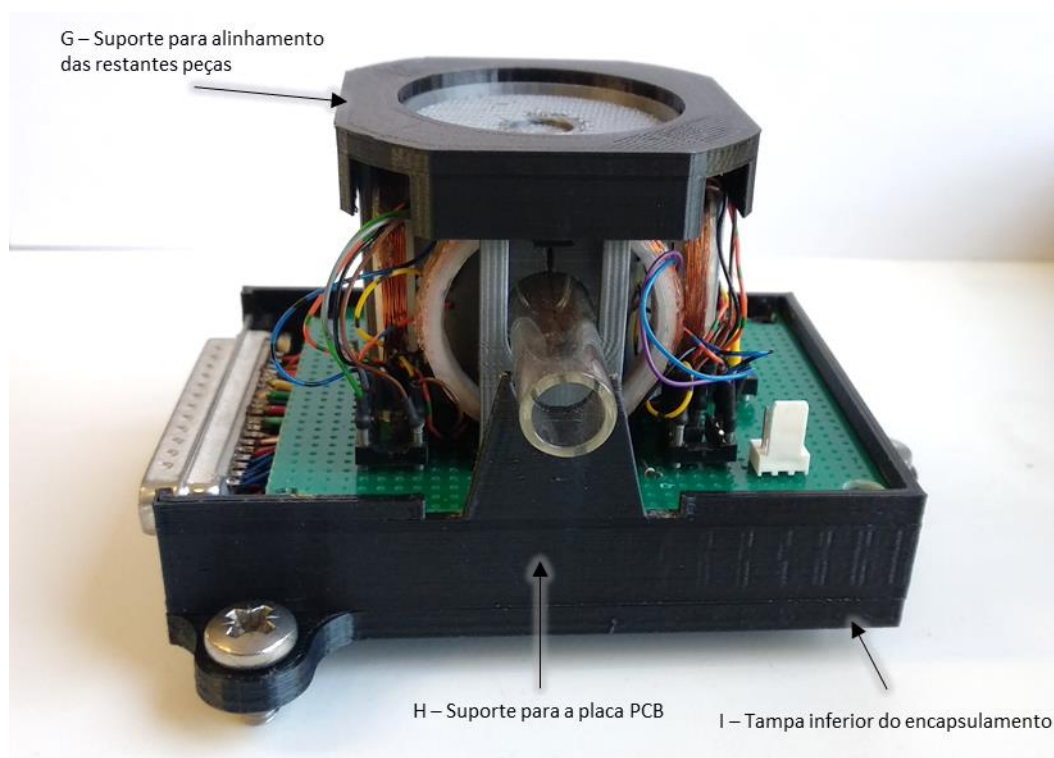


Figura 3-32 – Fase intermedia da montagem do dispositivo.



De modo a evitar que a ligação entre o sistema e os circuitos de controlo envolvesse a conexão individual de todos os cabos, uma placa PCB foi colocada abaixo da montagem. Nesta placa foram soldados encaixes para toda a cablagem necessária e organizados por grupos, de modo a se integrar um conector de 37 pinos macho para ligação de um cabo tipo DC-37 fêmea. Assim, tornou-se possível uma a ligação entre a caixa de controlo e o dispositivo com apenas uma conexão. A placa PCB encontra-se encaixada no respetivo suporte (H) enquanto que a peça (I) serve de tampa para acomodar a cablagem entre o conector DC-37 e os vários componentes (Figura 3-32). Para além disso, esta tampa serve também de suporte para o solenoide vertical inferior Figura 3-33.

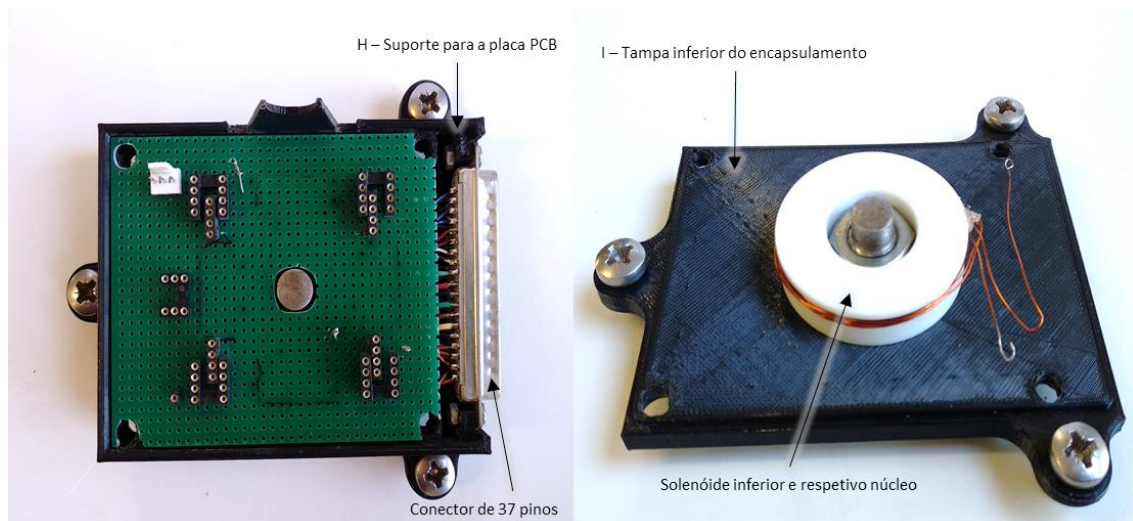


Figura 3-33 – Placa PCB responsável pelas ligações entre os sensores/bobines e o controlo, e respetivos suportes.

Para concluir a montagem do dispositivo, o solenóide de levitação vertical é colocado no topo da montagem anterior, e o encapsulamento é completo, tomando a forma da montagem ilustrada na Figura 3-29. Quatro parafusos M4 são usados para assegurar que o encapsulamento permanece fechado, sendo que as últimas peças a serem colocadas são os núcleos dos solenóides. Estes núcleos são responsáveis pelo alinhamento final do sistema e devem ser apertados sem o uso de qualquer ferramenta e apenas até se sentir pressão no aperto. O uso de uma chave de fendas para este aperto pode resultar na deformação das peças.

Uma alteração posterior à impressão foi também feita ao encapsulamento final de modo a melhorar o funcionamento do dispositivo. Esta alteração consistiu na abertura de um furo junto do solenóide de levitação superior ao rotor e na montagem de uma ventoinha, para assegurar que a temperatura do solenóide não atinge valores demasiado elevados para o bom funcionamento do sistema. Esta alteração visa permitir aumentar o tempo de funcionamento do protótipo.



O novo protótipo inclui uma caixa de controlo com o propósito de integrar todos os componentes que auxiliam e permitem o funcionamento do SRG.

A estrutura atual da caixa de controlo conta com o circuito de levitação vertical, o circuito de estabilização lateral, o circuito de aceleração do rotor e o circuito de aquisição de dados, bem como os respetivos microcontroladores. Para além dos circuitos essenciais ao sistema, foram também integrados transformadores regulados para alimentação de quase todos os circuitos, uma fonte de 9V para a alimentação dos microcontroladores, e uma fonte de 12V para o sistema de arrefecimento.

Atualmente, a fonte responsável por fornecer a corrente necessária para a aceleração do rotor é a única que não está integrada na caixa de controlo. Isto deve-se a que, se forem testadas outras bobines de aceleração no futuro, o valor desta fonte pode vir a ser diferente. A Figura 3-34 apresenta o interior da caixa de controlo, com a posição de todos os componentes descritos.

A frente da caixa (Figura 3-35) integra apenas o controlo do sistema de levitação, e o *enable* do sistema de aceleração, bem como dois LEDs para a identificação do estado dos sistemas. No entanto, uma vez que a frente da caixa é facilmente removível, uma continuação futura deste projeto pode integrar um display para os valores de pressão, bem como um maior número de controlos. No presente protótipo os valores de frequência do rotor têm de ser observados num computador ligado ao microcontrolador do circuito de aquisição de dados. Pode encontrar-se em anexos o processo de arranque do sistema atual bem como todo o equipamento necessário.

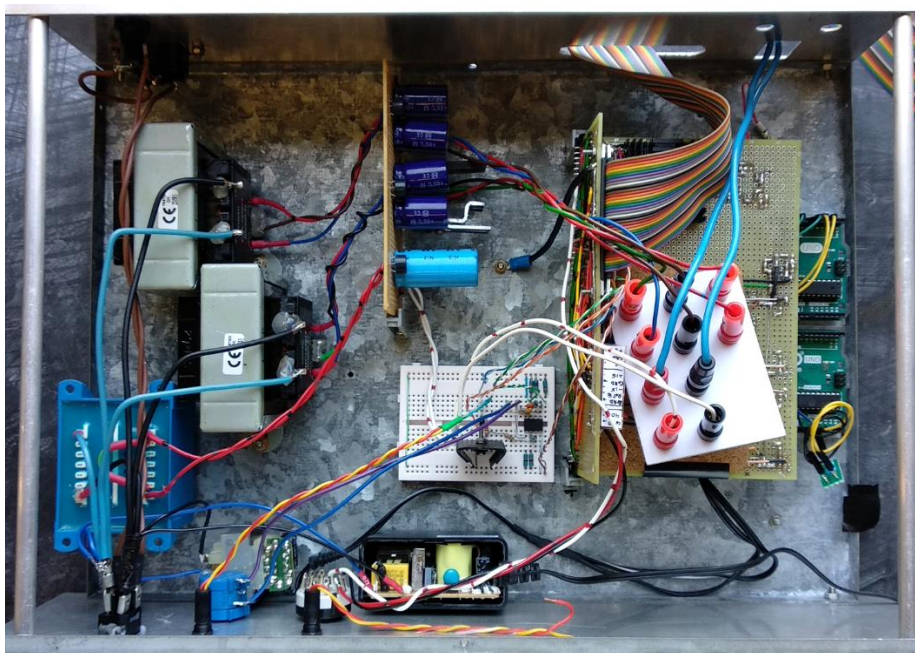


Figura 3-34 – Interior da caixa de controlo.



Figura 3-35 – Frente da caixa de controlo.

O LED-L corresponde ao LED1 da Figura 3-7 enquanto que o LED-A corresponde ao LED1 da Figura 3-14. O POT corresponde ao potenciômetro R5 da Figura 3-7, e SELECT corresponde ao seletor S1 da Figura 3-21.

Concluída a montagem do dispositivo e da unidade de controlo, resta apenas avaliar o desempenho deste protótipo, comparando-o com o seu antecessor.

## 4. Testes Finais do Protótipo - Um novo ponto de partida

Antes de estudar o comportamento deste protótipo em vácuo, foi necessário testar o processo proposto para ultrapassar a ressonância do rotor aproximadamente a 10Hz.

Este processo foi possível com o uso de um osciloscópio para a leitura do sinal óptico proveniente do foto transístor a fim de se confirmar quando o sistema entra em ressonância. O método para ultrapassar a ressonância do sistema, faz uso de um solenóide vertical inferior ao rotor, resultando numa frequência de ressonância ligeiramente maior (aproximadamente 13 Hz). Assim, no momento em que o sistema se aproxima da nova ressonância, o solenóide inferior deve ser desligado, ultrapassando-se assim a ressonância inicial. Infelizmente, na prática, este processo não é tão trivial quanto o descrito.

Para alimentar o solenóide inferior existem algumas limitações. A corrente do solenóide deve ser suficientemente alta para conseguir afetar o sistema, alterando consideravelmente a sua frequência de ressonância, mas não pode ser demasiado elevada evitando que a força atrativa deste solenóide prevaleça em relação à força do solenóide superior. Se a corrente for demasiado elevada é possível também que a base inferior do rotor toque no interior da câmara de vidro, limitando a aceleração e causando uma vibração axial quando o solenóide inferior é desligado.

Com o intuito de se ultrapassar este obstáculo, testaram-se várias formas de excitar o solenóide auxiliar, bem como diversos métodos de o “desligar”.

Quando o solenóide era simplesmente desconectado da fonte de alimentação, este provocava um pico de corrente induzida no sistema, que, se fosse forte o suficiente, era capaz de desligar completamente o solenóide superior. Esta disrupção do campo magnético, por vezes chamada de “chuto indutivo”, é outra das limitações desta solução encontrada para a ressonância.

Assim, em alternativa ao desligar do solenóide, passou-se a alterar a tensão de alimentação, por exemplo, de 8V para 1,5V, em oposição de 8V para 0V. A rapidez com que esta alteração era feita também influenciava a resposta do sistema, sendo que, se a variação da diferença de potencial fosse rápida de mais, acontecia o mesmo fenómeno descrito quando se desligava a alimentação. Por outro lado, se a variação fosse demasiado lenta, o valor da frequência de ressonância cruzava o valor da frequência de rotação do rotor e este entrava em ressonância.

Como se pode constatar, são vários os fatores que influenciam este processo, dificultando-o ainda mais. A falta de informação em relação às características do solenóide usado por Almeida (nº de espiras, diferença de potencial imposta, espessura do fio utilizado, etc.) levou a que vários tipos de solenóide fossem experimentados, no entanto, nenhum revelou bons resultados.

Apesar de todas estas iterações e variações do modelo proposto, durante o decorrer desta dissertação não foi possível ultrapassar o obstáculo que esta ressonância impôs, impossibilitando a aquisição de resultados a frequências mais elevadas. Ainda assim, considera-se que o presente

projeto tenha sido vantajoso, uma vez que, no estado em que se encontra atualmente, este protótipo é um excelente ponto de partida para futuros desenvolvimentos.

Idealmente, a presente tese focar-se-ia na continuação e aperfeiçoamento do protótipo e resultados atingidos por Almeida, mas tal não foi possível devido ao estado em que todo o sistema se encontrava.

Assim, como resultado final da presente dissertação, apresenta-se um protótipo robusto e versátil o suficiente para se poder projetar novos trabalhos usando os conhecimentos até agora alcançados, sem a necessidade de se investir tempo e recursos em reproduzir integralmente os protótipos anteriores.

Apesar de não ter sido possível apresentar a variação da frequência do rotor em função da pressão como resultado final, vários resultados intermédios relativos aos sistemas deste protótipo devem ainda ser discutidos, principalmente para os sistemas de levitação vertical e de estabilização horizontal.

#### Testes à levitação vertical

Os resultados do sistema de levitação vertical exibem uma melhor estabilidade na levitação face aos apresentados por Almeida. Uma análise do sinal na base do transistor T1 do circuito de levitação é apresentada na Figura 4-1 a azul.

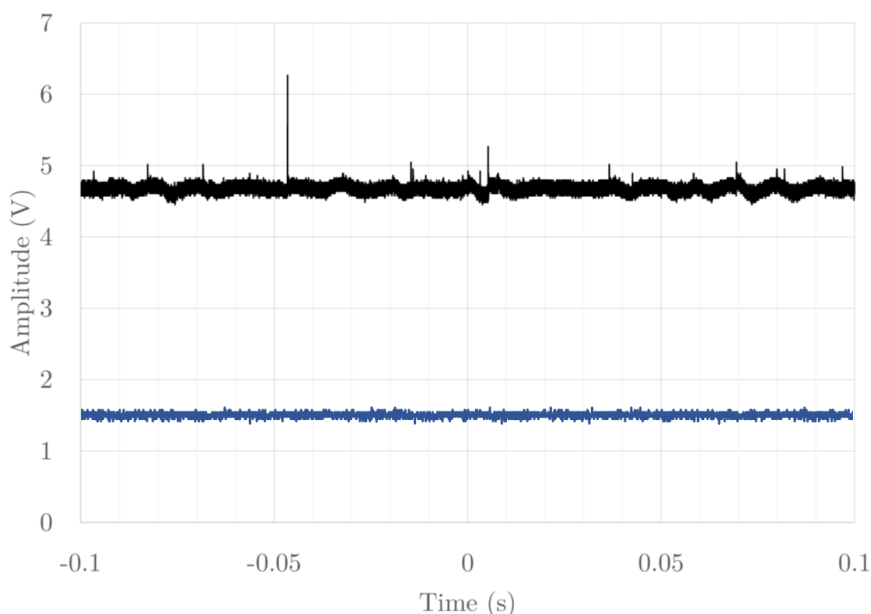


Figura 4-1 – Sinal do sistema de levitação vertical de Almeida (a preto) e do atual sistema de levitação (a azul).

Observou-se que, durante a aceleração do rotor, o sinal de posição vertical sofria alguma interferência, passando a exibir a frequência de rotação do rotor e com um sinal proveniente da frequência do sinal do sistema de aceleração (~5,2kHz). Este fenómeno já tinha sido constatado por Almeida. Propõe-se que a causa desta interferência seja o sistema de estabilização lateral. Os sensores de hall, apesar de paralelos ao campo de aceleração, continuam a captá-lo, e identificam

este campo como uma vibração do sistema. Ao tentar corrigir esta vibração, o sistema de estabilização está na realidade a introduzir um sinal no sistema de levitação, com a mesma frequência que o campo magnético de aceleração. Esta frequência é demasiado elevada para o rotor conseguir responder e não influencia de forma notória a sua estabilidade, no entanto, esta interferência entre sistemas talvez possa ser eliminada com o uso de filtros passa-baixo para o tratamento do sinal proveniente dos sensores de hall.

#### Testes à estabilização lateral

Para se poder observar o sistema de estabilização a atuar, é forçada uma oscilação horizontal no sistema, através de um deslocamento abrupto do dispositivo. Observa-se o momento em que a oscilação é imposta e passados alguns segundos de estabilização (Figura 4-2). A diminuição da amplitude ao longo do tempo é facilmente observada, constatando-se o funcionamento deste sistema dentro do espectável.

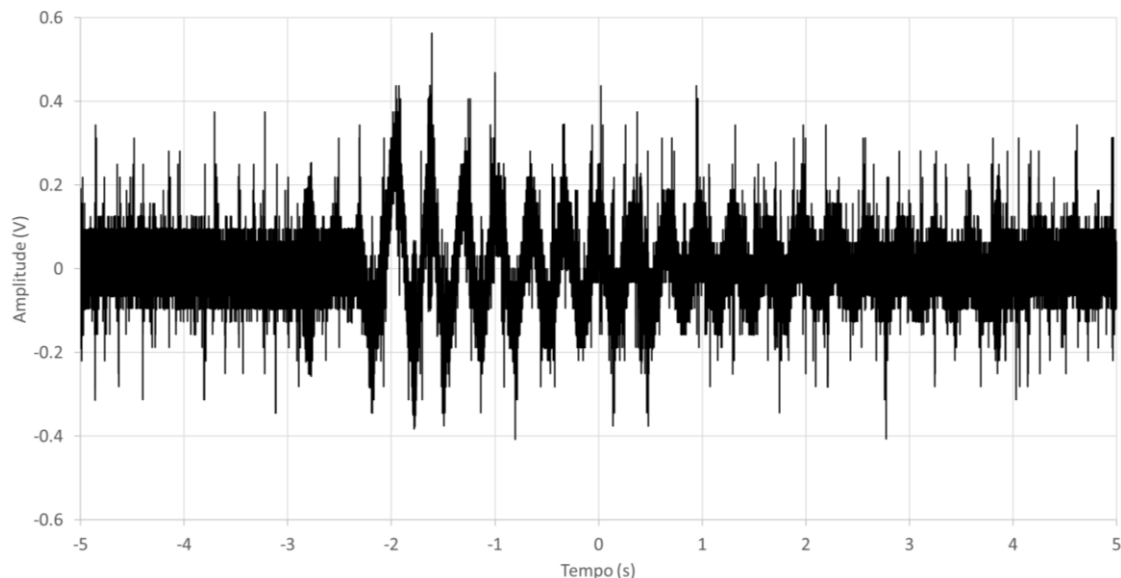


Figura 4-2 – Sinal do sistema de estabilização durante uma oscilação forçada do sistema.

À semelhança do sistema de levitação, existe também uma interferência com o sistema de aceleração, aparecendo ruído quando este sistema é ligado. Este ruído provém da frequência de excitação das bobinas de aceleração, confirmando-se assim a necessidade de uma filtragem do sinal proveniente dos sensores de hall.

Era interessante estudar uma forma de melhorar este sistema de forma a que fosse suficiente para amortecer a ressonância que o sistema experiencia ao acelerar. É possível que tal melhoria passe por substituir o tipo de bobinas utilizadas, bem como experimentar diferentes valores para a resistência R3 e o condensador C2 da Figura 3-15.

### Sistema de Aceleração e Sistema de Aquisição de dados

Devido ao sistema entrar em ressonância a  $\sim 10\text{Hz}$  não foi possível testar o comportamento do sistema de aceleração nem do sistema de aquisição de dados para frequências superiores. Testou-se, no entanto, a capacidade do Arduino adquirir dados para  $400\text{Hz}$ .

Com um gerador de sinais e para ondas triangulares e sinusoidais testou-se a resposta do microcontrolador bem como do código implementado, entre  $1\text{Hz}$  e  $500\text{Hz}$ . Obteve-se uma precisão de resultados muito satisfatória, sendo que o Arduino foi capaz de acompanhar a mudança de frequência sem erros a apontar. É de esperar que a precisão para um sinal óptico como o do sistema apresente menos precisão.

Em relação ao sistema de aceleração é difícil apresentar valores, uma vez que a aceleração do rotor diminui consideravelmente ao aproximar-se da frequência de ressonância, mas desde o arranque até se atingir os  $8\text{Hz}$ , o tempo de aceleração rondava os 40 segundos.

## 5. Conclusões Finais

Durante a elaboração deste projeto, um protótipo alternativo ao *spining rotor gauge* com rotor cilíndrico foi desenhado e implementado com relativo sucesso e posteriormente testado. Apesar das várias iterações deste protótipo, não foi possível ultrapassar a ressonância que o sistema exibe ao acelerar-se o rotor até ~10Hz. Esta limitação impediu que fosse possível apresentar a dependência linear da pressão com a taxa de desaceleração relativa do rotor. Contudo, os resultados intermédios relativamente aos sistemas individuais que compõem o novo protótipo revelaram-se satisfatórios. Assim, o protótipo atual constitui um contributo para o desenvolvimento posterior de um *spining rotor gauge* de rotor cilíndrico.

A levitação magnética vertical do rotor foi conseguida com uma ótima estabilidade, principalmente quando associado ao solenóide inferior. O alongamento do campo magnético devido a este segundo solenóide possibilita uma estabilização passiva que auxilia a função do sistema de estabilização lateral.

Este sistema de estabilização por sua vez, desempenha a sua função dentro da expectativa, todavia existe alguma margem para aperfeiçoamento, nomeadamente no tempo que leva a amortecer vibrações de maior amplitude. É desejável que possa vir a minimizar as vibrações oriundas da ressonância do sistema, ainda que tal nível de otimização pareça difícil de alcançar.

Uma das principais contribuições desta dissertação para o projeto, é o novo sistema de aceleração do rotor. A alternativa encontrada para o circuito de aceleração possibilita uma minimização da complexidade da eletrónica envolvida, bem como um aumento da sua versatilidade. Consequentemente, este é também o sistema mais suscetível de aperfeiçoamentos futuros. No futuro, a interferência que este sistema impõe nos restantes circuitos deverá ser minimizada. Idealmente este sistema não afetaria os sensores de hall responsáveis pela estabilização lateral, mas, não sendo esse o caso, é possível que uma filtragem do sinal proveniente destes sensores venha a ser necessária. Adicionalmente, devem ser testadas bobines de aceleração com indutâncias menores, na tentativa de aumentar a taxa de aceleração do rotor.

Ao longo deste documento são propostas diversas melhorias a ter em conta num projeto futuro, das quais se destacam a necessidade de um processo consistente para ultrapassar a ressonância encontrada (~10Hz). Para o desenvolvimento posterior deste tema deve ser dada prioridade à resolução desta limitação.

O protótipo desenvolvido durante o atual projeto constitui uma mais valia como ponto de partida para projetos futuros.





## 6. Bibliografia

- [1] P. Almeida, “Cylindrical Spinning Rotor Gauge — A new approach for vacuum measurement,” NOVA University of Lisbon, 2015.
- [2] J. K. Fremerey, “The spinning rotor gauge,” *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 3.3, pp. 1715–1720, 1985.
- [3] B. E. Lindenau, J. K. Fremerey, and K. Witthauer, “Spinning rotor gauge for operation at free spatial orientation,” *Vacuum*, vol. 46, no. 8–10, pp. 835–837, 1995.
- [4] H. Isogai, “An analysis of the effects of eddy currents on the accuracy of a Spinning Rotor Gauge,” *Vacuum*, vol. 48, no. 2, pp. 175–179, Feb. 1997.
- [5] MKS Instruments, “Spining Rotor Gas Friction Vacuum Gauge.” MKS Instruments France S. A., Le Bourget - Paris.
- [6] J. K. Fremerey and K. Boden, “Active permanent magnet suspensions for scientific instruments,” *J. Phys. E.*, vol. 11, no. 2, pp. 106–113, Feb. 1978.
- [7] J. K. Fremerey, “Spinning rotor vacuum gauges,” *Vacuum*, vol. 32, no. 10–11, pp. 685–690, Jan. 1982.
- [8] F. T. Holmes, “Axial magnetic suspensions,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 8, no. 11, pp. 444–447, 1937.
- [9] J. W. Beams, D. M. Spitzer, and J. P. Wade, “Spinning rotor pressure gauge,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 33, no. 2, pp. 151–155, 1962.
- [10] J. W. Beams, J. L. Young, and J. W. Moore, “The production of high centrifugal fields,” *J. Appl. Phys.*, vol. 17, no. 11, pp. 886–890, 1946.
- [11] G. Aubert, J. F. Jacquinet, and D. Sakellariou, “Eddy current effects in plain and hollow cylinders spinning inside homogeneous magnetic fields: Application to magnetic resonance,” *J. Chem. Phys.*, vol. 137, no. 15, 2012.
- [12] Y. Zhilichev, “Analytical solutions of eddy-current problems in a finite length cylinder,” *Adv. Electromagn.*, vol. 7, no. 4, pp. 1–11, 2018.
- [13] Texas Instruments, “L293D Quadrupel Half-H Drivers.” SLRS008D datasheet, 1986.
- [14] “ICs > PMIC - Motor Drivers, Controllers > STMicroelectronics L6228N.” [Online]. Available: <https://www.digikey.pt/product-detail/en/stmicroelectronics/L6228N/497-5350-5-ND/1038172>. [Accessed: 22-Sep-2019].



## 7. Anexos

```
#include <Stepper.h>
#define STEPS 40
Stepper stepper(STEPS, 3, 5, 6, 9);
void setup() {
  stepper.setSpeed(65535);
}

void loop() {
  stepper.step(1);
}
```

Figura 7-1 – Código responsável pelo controlo do circuito de aceleração.

```

int MAX=750; // Threshold maximo.
int MIN=250; // Threshold minimo.
int FRQ=400; // Frequencia a atingir.
unsigned long th0 = 100000000;

void setup() {
  Serial.begin(2000000);
  digitalWrite(13, HIGH);
}

void loop() {
  th0 = theta();
  if(100000000/th0 < FRQ){
    digitalWrite(13, HIGH); // Ligar/manter ligado o enable.
    th0 = theta();
  }

  else{
    digitalWrite(13, LOW); // Desligar o enable.
    unsigned long th1 = theta();
    unsigned long th2 = theta();
    unsigned long PRS = 3.35*1000*((4*(th2-
th1))/((th2+th1)*(th2+th1)));
  }
}

float theta(){
  boolean flag=true;
  unsigned long t0 = micros();
  unsigned long t1 = 0;
  int i = 0;
  for(i=0;i<=9999999;){
    if (flag == true and analogRead(A0)> MAX){
      i++;
      flag = !flag;
      if(i>=101){
        t1 = micros();
        return (t1-t0);
      }
    }
    if (flag == false and analogRead(A0)< MIN){
      flag = !flag;
    }
  }
}

```

Figura 7-2 – Código necessário para o cálculo da pressão.

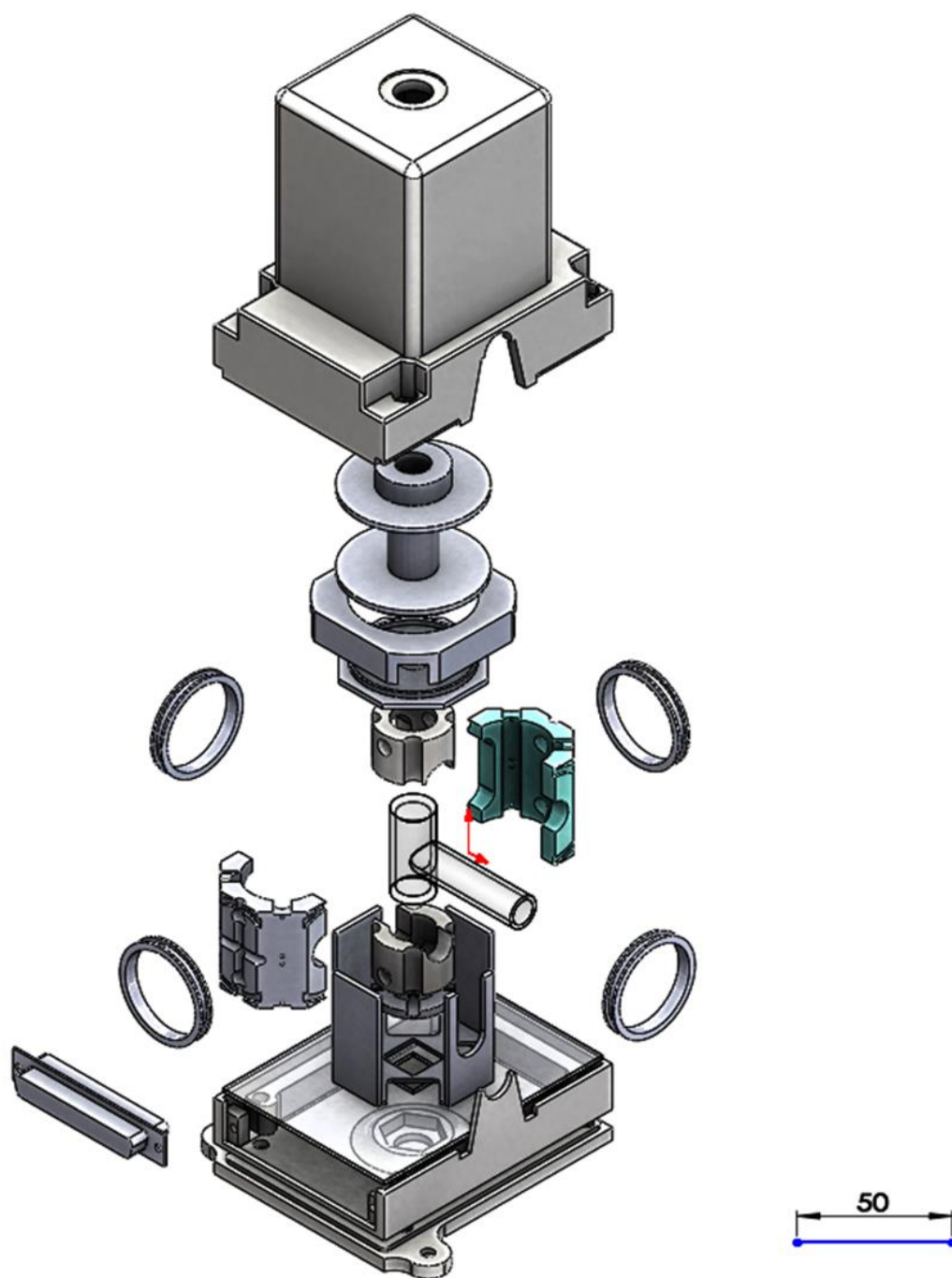


Figura 7-3 – Vista expandida dos vários componentes modelados.

Tabela 7-1 – Posição dos conectores do dispositivo.

Secção Norte		Secção Este	
	N1 Rotor Coil A		E1 5 Volts
	N2 Rotor Coil B		E2 Fototransistor
	N3 Lateral Coil <sub>NT</sub>		E3 Lateral Coil ET
	N4 Lateral Coil <sub>ND</sub>		E4 Lateral Coil EB
	N5 5 Volts Hall T		E5 5 Volts Hall T
	N6 5 Volts Hall B		E6 5 Volts Hall B
	N7 Ground Hall T		E7 Ground Hall T
	N8 Ground Hall B		E8 Ground Hall B
	N9 Ground LCT		E9 Ground LCT
	N10 Ground LCB		E10 Ground LCB
	N11 Hall Signal T		E11 Hall Signal T
	N12 Hall Signal B		E12 Hall Signal B
Secção Oeste		Secção Sul	
	O1 Rotor Coil C		S1 5 Volts
	O2 Rotor Coil D		S2 LED Grnd
	O3 Lateral Coil <sub>OT</sub>		S3 Lateral Coil ST
	O4 Lateral Coil <sub>OB</sub>		S4 Lateral Coil SB
	O5 5 Volts Hall T		S5 5 Volts Hall T
	O6 5 Volts Hall B		S6 5 Volts Hall B
	O7 Ground Hall T		S7 Ground Hall T
	O8 Ground Hall B		S8 Ground Hall B
	O9 Ground LCT		S9 Ground LCT
	O10 Ground LCB		S10 Ground LCB
	O11 Hall Signal T		S11 Hall Signal T
	O12 Hall Signal B		S12 Hall Signal B

Exemplo: Fio Azul com riscas pretas

